ATLANTI UNIVERSALI GIUNTI

ISBN 88-09-21337-8

C.M. 16338-U

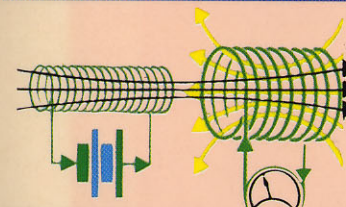
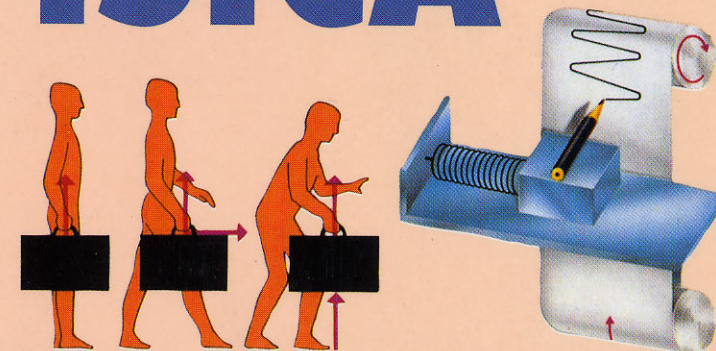
Prezzo L. 10.000

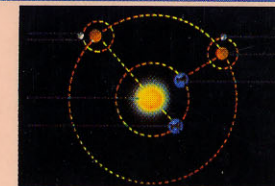
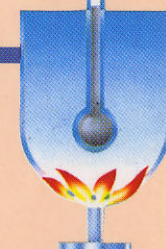
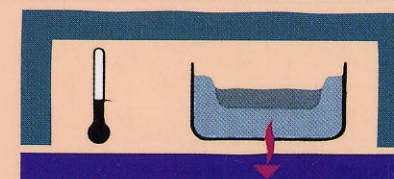
FISICA

GIUNTI

ATLANTI UNIVERSALI GIUNTI

FISICA

MECCANICA

ELETTRICITÀ E MAGNETISMO

TERMOLOGIA

OTTICA

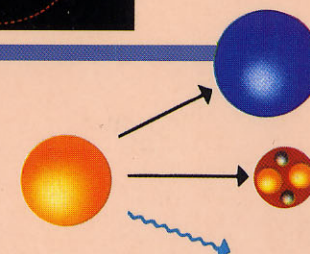
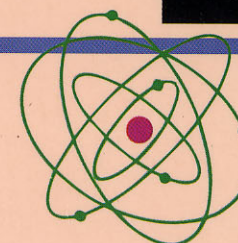
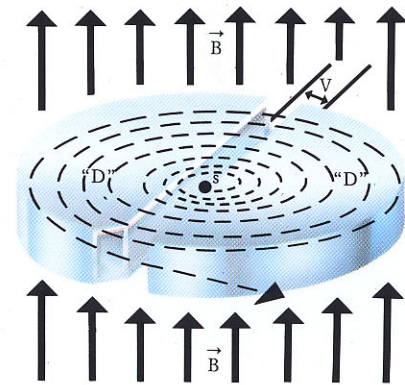
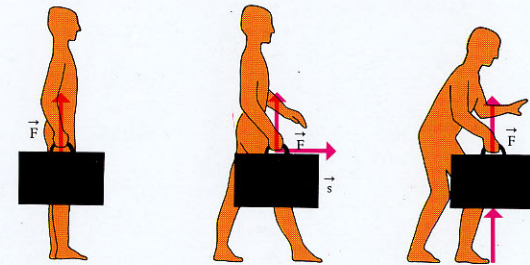
L'ATOMO

GIUNTI

ATLANTI UNIVERSALI GIUNTI

FISICA

FISICA

$\vec{F}$ $\vec{F}$ $\vec{s}$ $\vec{F}$

La meccanica

Grandezze fisiche

La fisica rappresenta il laboratorio naturale per l'applicazione del *metodo scientifico*: esperimento, con osservazione quantitativamente accurata dei dati; astrazione e formulazione di una legge in forma matematica; previsione di nuovi risultati.
La fisica è una scienza quantitativa. Al di là di una semplice descrizione, essa mira a stabilire la relazione che corre tra le grandezze (*grandezze fisiche*) che definiscono il fenomeno. I risultati delle osservazioni sperimentali e le previsioni delle teorie sono sempre riconducibili a *numeri*: perciò il linguaggio usato nella fisica è il *linguaggio matematico* che, con una scrittura simbolica breve (*formula*), permette di abbracciare tutta la legge.
Per descrivere la caduta di un corpo, una persona priva di conoscenze nel campo della fisica dice che il corpo, prima fermo, ha preso a cadere sempre più in fretta: l'idea del processo risulta, in tal modo, vaga e approssimata. Se invece diciamo, utilizzando il linguaggio della scienza, che il corpo parte da uno stato di riposo e cade con accelerazione costante di 9,8 m/sec^2, ci rendiamo subito conto del movimento in atto e possiamo determinare la velocità del corpo e la sua posizione ad ogni istante. Il quadro che si ottiene è completo e conciso.

Ordini di grandezza

Nel mondo fisico convivono grandezze piccole insieme a grandezze molto grandi: le dimensioni di un atomo e le dimensioni dell'universo; il tempo che occorre alla luce per andare da questa pagina all'occhio di chi guarda e l'età dell'universo; la massa dell'elettrone e le masse galattiche. La distanza della più lontana galassia osservata è, ad esempio, cento milioni di milioni di milioni (→ 1) di volte l'altezza di un uomo, mentre l'esistenza di una particella subatomica instabile è un milionesimo di milioni di milioni di milioni (→ 1) la durata di un battito cardiaco.
Trattando di misure — per le distanze, i tempi e le masse —, nell'intervallo accessibile alla sperimentazione fisica, dovremo ricorrere a una notazione fondata sulle cosiddette *potenze di 10*.
Ad esempio: moltiplicando 10 per se stesso un certo numero di volte, si ha: $10 \times 10 = 100 = 10^2$, $10 \times 10 \times 10 = 1000 = 10^3$ ....: il numero di volte, per cui 10 è moltiplicato per se stesso, figura nel risultato quale *esponente di 10*. Quando la potenza di 10 è presente nel denominatore, si attribuisce all'esponente il segno negativo: $1/10 = 0{,}1 = 10^{-1}$, $1/100 = 0{,}01 = 10^{-2}$ ... Una potenza di 10 si dice *ordine di grandezza*.
La figura (→ 1) indica, in forma schematica, lo straordinario campo di variazione delle distanze presenti nell'universo: un intervallo superiore, come si può vedere, ai quaranta ordini di grandezza.
La figura successiva (→ 2) riporta invece gli ordini di grandezza riferiti ai tempi.

Grandezze scalari e grandezze vettoriali

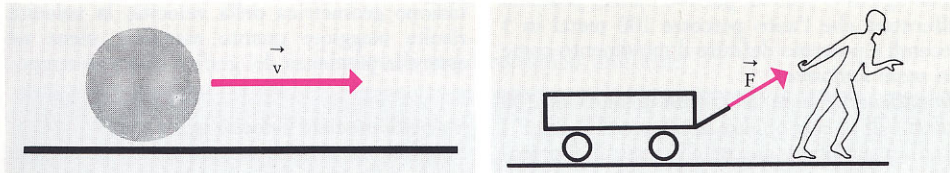
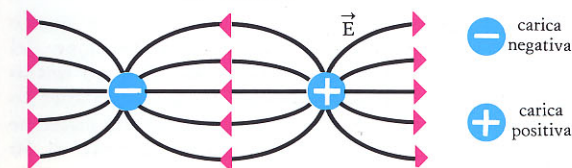
Sono *grandezze scalari* il volume, la massa, la temperatura, il tempo, l'energia, ecc., grandezze definite mediante il semplice numero che ne dà la misura di valore rispetto a una determinata scala di riferimento (di volumi, di masse, di temperatura, ecc.).
Altre grandezze, definite non con un semplice numero ma con numeri associati a simboli di *direzione* e *verso*, prendono il nome di *grandezze vettoriali*. Non basta dire che un'auto ha percorso 10 km, ma occorre precisare la direzione e il verso del movimento.
Sono esempi tipici di grandezze vettoriali: lo spostamento di un corpo, la sua velocità (→ 3), l'accelerazione, la forza (→ 4); un campo elettrico (→ 5); un campo magnetico (→ 6).
Tutte queste grandezze sono rappresentate da *vettori* (→ 7), cioè da segmenti, orientati da una freccia, che ne determina la direzione e il verso. La lunghezza (*modulo*) del vettore, determinata rispetto all'unità prefissata, ne misura l'intensità.
Due vettori si dicono *uguali* quando hanno moduli identici e direzione e verso uguali. I vettori si possono rappresentare con i simboli in grassetto: **a, b, c...** (oppure $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$...).
Per sommare i vettori **A** e **B**, si fa coincidere l'origine di **A** con l'estremità di **B**, ottenendo così il *vettore-somma* **C** = **A** + **B** (→ 8).
La regola vale per qualunque numero di vettori; si può inoltre dimostrare che, quale che sia l'ordine dei vettori (*proprietà commutativa*), si ottiene sempre lo stesso vettore-somma.

Le grandezze fisiche

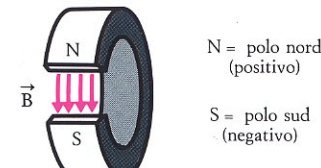
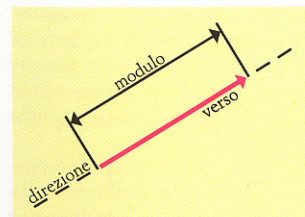
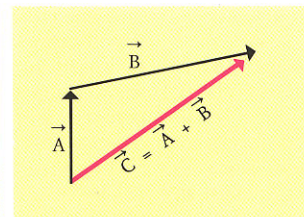
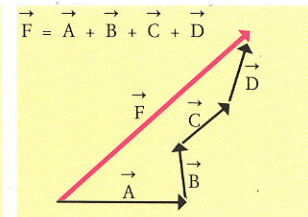
DISTANZE	ordine di grandezza
Distanza della più lontana galassia osservata	10^{26} m
Distanza della galassia più vicina	10^{22} m
Distanza della stella più vicina (anno luce)	10^{17} m
Distanza del sole	10^{11} m
Diametro della terra	10^{7} m
Un chilometro	10^{3} m
Altezza di un uomo	10^{0} (1 m)
Spessore di un dito	10^{-2} m
Spessore di un foglio di carta	10^{-4} m
Dimensioni di un batterio	10^{-5} m
Dimensioni di un virus	10^{-8} m
Diametro di un atomo	10^{-10} m
Diametro di un nucleo	10^{-14} m

1. Il campo di variazione delle distanze.

TEMPI	ordine di grandezza
Età dell'universo	10^{17} sec
Precessione dell'asse terrestre	10^{12} sec
Durata della vita umana	10^{9} sec
Un anno	10^{7} sec
Un giorno	10^{5} sec
Viaggio della luce dal Sole alla Terra	10^{3} sec
Intervallo tra due battiti cardiaci	10^{0} sec (1 sec)
Battito d'ala di mosca	10^{-3} sec
Durata lampo stroboscopico	10^{-5} sec
Durata breve impulso laser	10^{-9} sec
Tempo in cui la luce traversa un atomo	10^{-18} sec
Vita di una particella subatomica instabile	10^{-23} sec

2. Il campo di variazione dei tempi.

3. Velocità

4. Forza

5. Campo elettrico

N
S
B
N = polo nord (positivo)
S = polo sud (negativo)

6. Campo magnetico

7. Un vettore: grandezza vettoriale

8. Il vettore **C** è la somma dei vettori **A** e **B**.

9. Somma di più vettori

La cinematica

Il moto è l'argomento fondamentale che ricorre in tutti i rami della fisica: gli atomi sono in movimento, in tutte le forme della materia; il moto degli elettroni produce corrente elettrica; i pianeti si muovono intorno al Sole, anche le galassie si muovono nello spazio.
La cinematica studia il moto dei corpi, indipendentemente dalle cause.

Moto rettilineo uniforme

Prendiamo, ad esempio, come oggetto di osservazione il movimento di un'automobile.
Con un cronometro misuriamo il tempo che impiega a percorrere la distanza indicata da due segnali stradali posti a 100 metri l'uno dall'altro (→ 1). Si fa partire il cronometro al passaggio dell'auto dinanzi al primo segnale e lo si ferma al successivo: lo strumento indica che l'auto ha percorso questa distanza in 5 secondi.
Dopo una serie di ripetuti, analoghi esperimenti, anche in luoghi diversi, se i risultati rimangono uguali (5 secondi per 100 metri), potremo affermare che l'auto percorre 100 metri in 5 secondi e potremo definire il movimento come un *moto uniforme*.
È evidente che se le misure fossero di 200 metri e di 10 sec, oppure di 50 m e di 2,5 sec, i risultati sarebbero ancora gli stessi: il quoziente tra spazio e tempo è uguale a 20, corrispondente al numero dei metri percorsi in un secondo. Il rapporto tra spazio percorso e tempo impiegato si dice *velocità*; nei moti uniformi il rapporto è *costante*.
Le misure di velocità vengono espresse in metri al secondo (m/sec), centimetri al secondo (cm/sec) e chilometri all'ora (km/h).
Dato che un chilometro equivale a 1000 metri e un'ora a 3600 secondi, se ne deduce che l'auto dell'esempio precedente si muoveva a una velocità costante di 72 km/h.
Se il percorso tracciato dal mobile (*traiettoria*) è una retta e la velocità è costante, si dice che il moto è *rettilineo e uniforme*.
Ritorniamo all'esempio iniziale. Se facciamo partire il cronometro quando l'auto passa al segnale dei 100 metri, lo spazio di 100 metri si dice *spazio iniziale*: esso viene in genere indicato con $s_0 = s\ (t = 0)$, corrispondente all'istante iniziale in cui partono i tempi. Indichiamo con s lo spazio corrispondente al valore t, e con v la velocità (nel moto rettilineo uniforme la velocità ha la direzione e il verso del moto). Avremo pertanto:

$$v = \frac{s - s_0}{t}$$

cioè:

$$s = vt + s_0$$

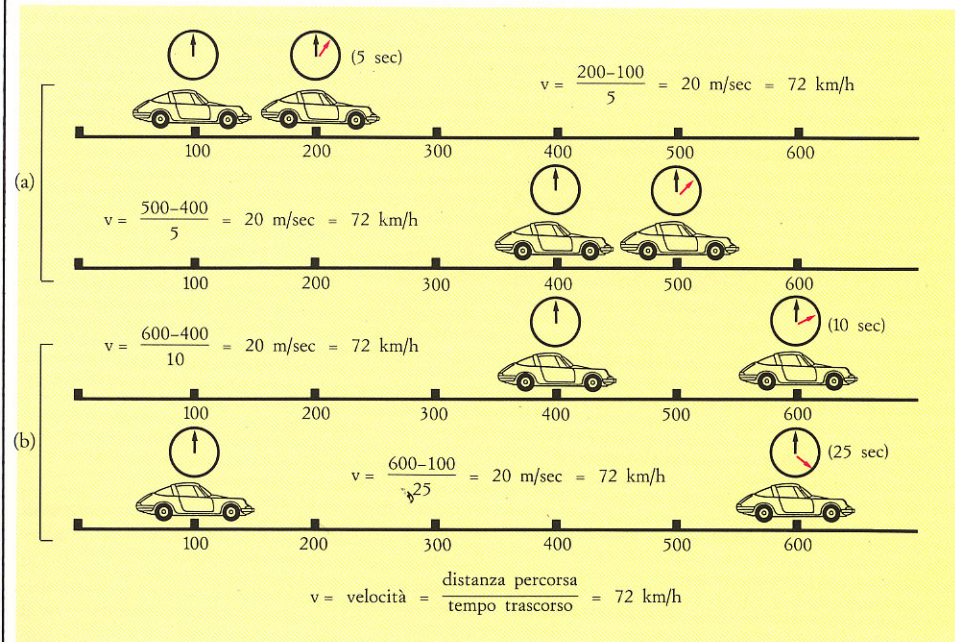
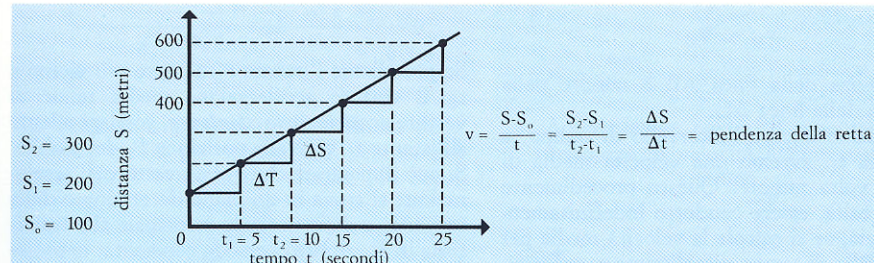
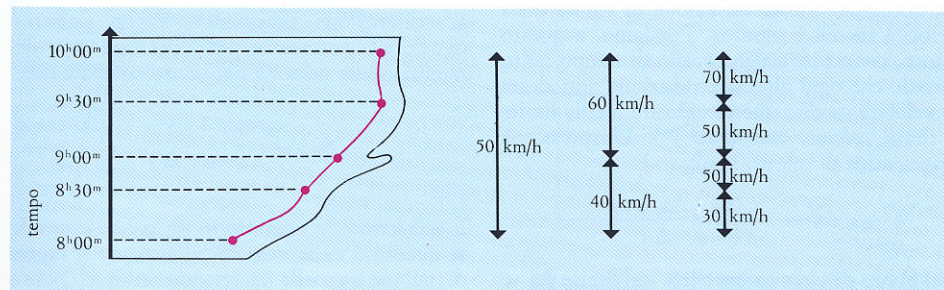
Questa è la *legge del moto uniforme*.

Rappresentazioni grafiche

Questi risultati possono essere rappresentati per mezzo di grafici indicando sull'asse orizzontale (*ascisse*) i valori del tempo, e su quello verticale (*ordinate*) i valori dello spazio.
Ogni posizione del mobile è rappresentata da un punto del piano, determinato dal tempo e dallo spazio corrispondenti a quella posizione. L'insieme di questi punti dà origine a una *retta* (→ 2), caratteristica del moto rettilineo uniforme.
La *pendenza* della retta fornisce una rappresentazione geometrica della velocità: la velocità risulta maggiore quanto maggiore viene ad essere la pendenza del grafico distanza-tempo.

Velocità media e velocità istantanea

Supponiamo che un veicolo debba percorrere 100 km in 2 ore: la velocità sarà di 50 km/h (→ 3).
Si osserva, prima di tutto, che in questo esempio non si accenna alla direzione del percorso (ci limitiamo infatti al moto rettilineo) e, in secondo luogo, che si precisa soltanto la velocità media: non viene indicato infatti se il veicolo tiene una velocità costante di 50 km/h oppure se si verificano fermate e partenze. Se i primi 40 km sono percorsi in un'ora (con velocità costante di 40 km/h), e i rimanenti nell'ora successiva (con velocità costante di 60 km/h), la *velocità media* per l'intero percorso, definita come quoziente tra spazio totale percorso e tempo impiegato, rimane quella indicata: 50 km/h.
Se l'oggetto non si muove con velocità costante, la velocità media dipende dall'intervallo di tempo prescelto. Nell'esempio considerato, la velocità media è, durante la prima ora, di 40 km/h, mentre nella seconda è di 60 km/h.

Il moto rettilineo uniforme

1. Esempi di moto rettilineo uniforme.

2. Grafico distanza-tempo del moto rettilineo uniforme.

3. Le velocità medie su tratti diversi di uno stesso percorso.

Per avere informazioni più dettagliate, si dovrebbero conoscere le distanze percorse ogni mezz'ora, ogni 5 minuti, ogni minuto, ecc.: quanto più ristretto è l'intervallo di tempo preso in considerazione, tanto più preciso è il risultato (→ 1).
Con l'introduzione del concetto di *velocità istantanea* si può disporre di un metodo per determinare la velocità che dà una risposta univoca, senza che sia necessario specificare il tempo prescelto.
Supponiamo di conoscere un certo moto e di poter rappresentare la posizione del mobile in funzione del tempo per mezzo di una curva (→ 2).
Partiamo dal punto A, corrispondente allo spostamento S_1 nel tempo t_1. Se assumiamo come posizione finale il punto C, corrispondente allo spostamento S_3 e all'istante t_3, la velocità media in questo intervallo risulta:

$$v_{13} = \frac{S_3 - S_1}{t_3 - t_1}$$

Se, in un secondo tempo, riduciamo l'intervallo di tempo a $t_2 - t_1$, abbiamo la velocità media:

$$v_{12} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1}$$

$$v_{12} < v_{13}$$

La pendenza della linea AB è minore della pendenza della linea AC.
Se riduciamo ancora l'intervallo di tempo, a partire da t_1, avremo una velocità media di volta in volta minore. Questo procedimento può, in realtà, essere condotto indefinitamente; tuttavia, se si calcola la velocità media per un intervallo di tempo piccolissimo e, successivamente, per un intervallo di tempo più piccolo, noteremo che la variazione di valore della velocità media è minima. Possiamo, a questo punto, concepire un intervallo di tempo tanto piccolo che ogni ulteriore riduzione non altera la velocità media: questa velocità media limite è detta *velocità istantanea* (v). L'espressione matematica di questo risultato è:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{S}}{\Delta t}$$

Dal punto di vista geometrico, nel limite $\Delta t = t_2 - t_1 \to 0$ il punto B si approssima ad A, seguendo la curva, in modo che la retta che unisce B con A tende alla tangente alla curva in A. Così la pendenza della retta BA, che è la velocità media v_{12}, tende, in questo processo di limite, alla pendenza della tangente in A (che è la velocità istantanea in A). La velocità istantanea, in qualunque posizione, sarà data dalla pendenza della tangente alla curva spazio-tempo nel punto che rappresenta quella posizione.

Accelerazione

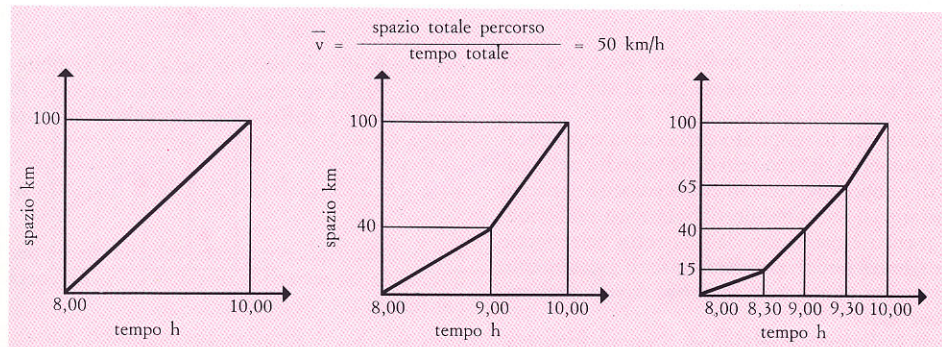
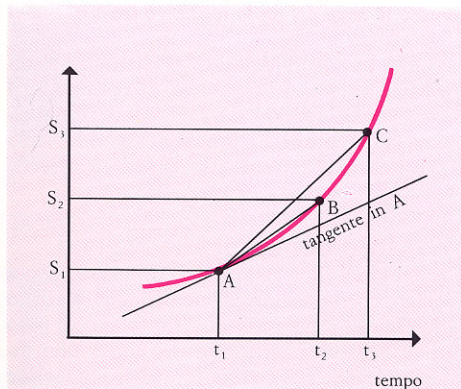
Fino a questo momento, non abbiamo considerato i cambiamenti di direzione (o di verso) del moto, ed abbiamo solo parlato della variazione del modulo di velocità (Δv). Ma la variazione di velocità può derivare anche dal cambiamento della direzione del moto.
In → 3 è rappresentata la traiettoria di un mobile e le sue velocità v_1 e v_2, alle posizioni P_1 e P_2, occupate, rispettivamente, negli istanti t_1 e t_2; il vettore $\Delta\vec{v}_2$ rappresenta la variazione di velocità in questo intervallo di tempo. L'accelerazione media tra gli istanti t_2 e t_1 è un vettore con direzione e verso di $\Delta\vec{v}_{12}$. Il modulo di tale vettore è dato dal quoziente tra il modulo della variazione di velocità e il tempo $t_2 - t_1$.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

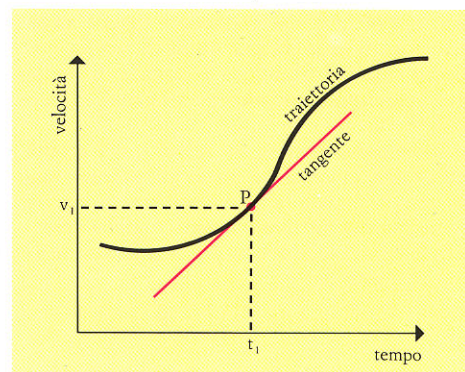
Se prendiamo l'istante t_2, sempre più vicino a t_1, il vettore accelerazione media tende al vettore *accelerazione istantanea*, corrispondente all'istante t_1, cioè alla posizione P_1 del mobile. Si può dimostrare che questo vettore di accelerazione si trova in un piano determinato dalla tangente e dalla normale principale alla traiettoria in P_1, diretto verso la concavità; le proiezioni del vettore accelerazione si dicono *componenti tangenziale* e *normale* (→ 4).
L'accelerazione tangenziale in un punto è uguale alla variazione per unità di tempo del modulo della velocità nel punto considerato:

$$a_t = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

L'accelerazione normale in un punto è uguale al quadrato della velocità, diviso per il raggio di curvatura della traiettoria in quel punto (→ 4):

Le grandezze cinematiche

1. La velocità media è il rapporto tra lo spazio percorso e il tempo impiegato.

2. Velocità istantanea in A: il limite della velocità media per spostamenti sempre più piccoli da A e per tempi sempre più brevi.

3. Accelerazione media: il rapporto tra la variazione di velocità e l'intervallo di tempo.

4. L'accelerazione nelle sue componenti normale e tangenziale.

5. La pendenza della curva in P è il valore dell'accelerazione istantanea nel punto.

$$a_n = \frac{v^2}{\rho}$$

Rappresenteremo ora mediante una curva non più le posizioni del mobile, ma le sue velocità in funzione del tempo (p. 9 → 5).
La tangente in un punto della curva rappresenta l'aumento del modulo della velocità nell'unità di tempo. Nel caso in cui la velocità conservi costante il suo modulo (movimento uniforme) il grafico è costituito da una retta orizzontale (pendenza nulla); possiamo quindi giustamente affermare che *i moti uniformi hanno accelerazione nulla.*
Se la traiettoria è rettilinea, il raggio di curvatura è di conseguenza infinito in tutti i suoi punti e quindi: l'accelerazione normale risulta nulla: *i moti rettilinei hanno accelerazione normale nulla.*

Moto rettilineo uniformemente accelerato

Viene indicato come *moto rettilineo uniformemente accelerato* il moto rettilineo con accelerazione costante: l'accelerazione risulta puramente tangenziale, appunto perché il moto è rettilineo; inoltre, poiché la direzione della tangente è quella della retta, l'accelerazione è un vettore in quella stessa direzione.
Assegnando un verso alla traiettoria, l'accelerazione è determinata dal modulo con il segno + o con il segno −, a seconda che il suo verso sia positivo o negativo rispetto alla traiettoria. Accelerazione costante significa quindi accelerazione con modulo e segno costanti.
Inoltre, poiché l'accelerazione è uguale all'incremento di velocità per unità di tempo e in questo caso è costante, a intervalli di tempo uguali corrispondono incrementi uguali di velocità (→ 1).
Se indichiamo con v_0 la velocità del mobile nell'istante in cui si dà inizio alla misurazione dei tempi, e con v la velocità al tempo t, l'incremento (positivo o negativo) della velocità in tale intervallo è $v - v_0$. L'accelerazione a è data pertanto da:

$$a = \frac{v - v_0}{t}$$

Da ciò si deduce:

$$v = v_0 + at$$

equazione di una retta in un grafico velocità-tempo. Per determinare lo spazio percorso in un tempo t, è sufficiente calcolare la velocità media $\bar{v}$ (→ 2):

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} = v_0 + \frac{1}{2}at$$

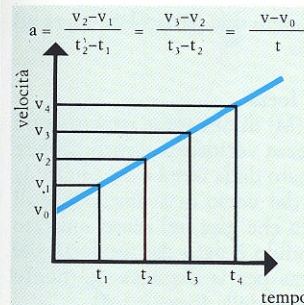
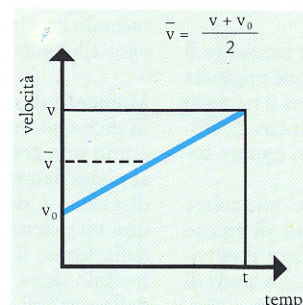
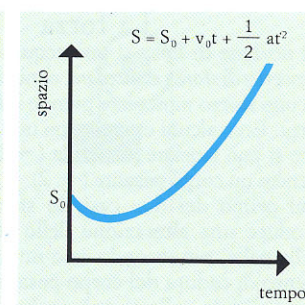
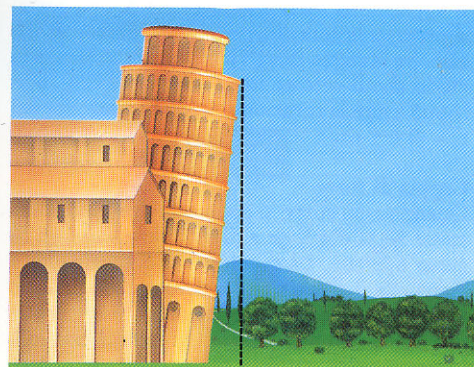
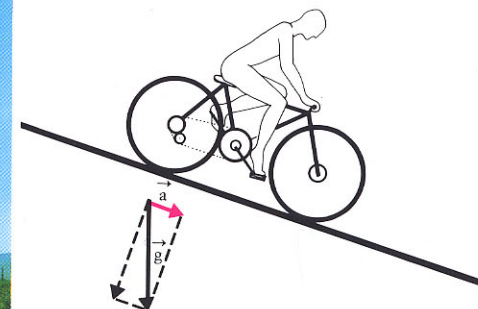
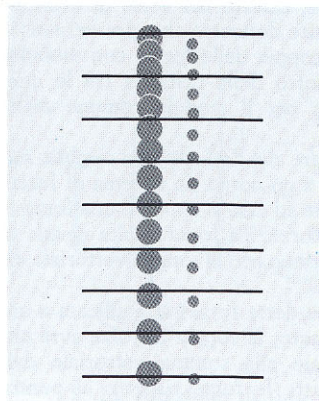
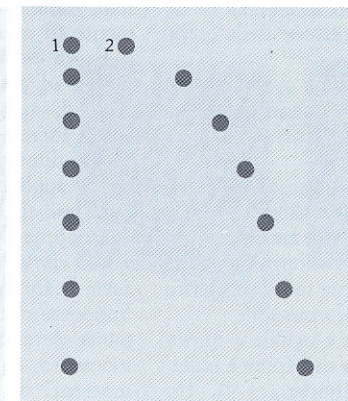
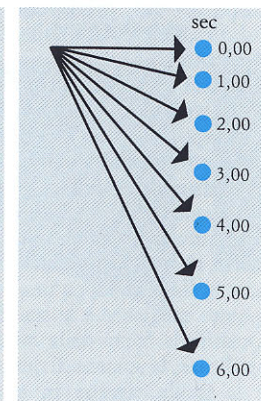
e quindi moltiplicare questa velocità media per il tempo t. Si ottiene la distanza $s - s_0$ percorsa nel tempo t:

$$s - s_0 = v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

ovvero la *legge del moto rettilineo uniformemente accelerato* (→ 3).
Le unità di misura dell'accelerazione nel sistema MKS (metro, chilogrammo, secondo) sono il metro per secondo al secondo (m/sec²); nel sistema cgs (centimetro, grammo, secondo) sono il centimetro al secondo per secondo (cm/sec²).

Moto dei corpi che cadono

I primi studi sulla caduta dei corpi si devono a Galileo, che lasciando cadere dall'alto (secondo la tradizione dalla torre di Pisa) oggetti di peso diverso, stabilì che il peso del corpo non influenza il moto di caduta (→ 4, 5) e concluse che il moto di caduta libera è un moto uniformemente accelerato. Le tecniche attuali permettono di verificare l'ipotesi di Galileo: ad esempio con una fotografia stroboscopica si può verificare che due sfere di massa diversa cadono alla stessa velocità (→ 6).
L'accelerazione di un corpo in caduta libera in prossimità della superficie terrestre è stata calcolata pari a 9,8 m/sec², detta *accelerazione di gravità* (g).
Nella figura (→ 7) sono rappresentate due sfere liberate nello stesso istante: la sfera 1 è stata lasciata cadere, mentre alla sfera 2 è stata impressa una velocità orizzontale iniziale. Si può verificare che per entrambe le sfere i componenti verticali della velocità sono uguali.
Nella figura successiva (→ 8) è riportata la sequenza dei vettori velocità per la sfera 2.

Il moto uniformemente accelerato

1. La relazione tra velocità e tempo è lineare.

2. La velocità media è la media aritmetica tra velocità iniziale e finale.

3. Grafico spazio-tempo per un moto uniformemente accelerato.

4. L'accelerazione dei corpi in caduta libera è costante indipendentemente dalla massa.

5. Su un piano privo di attrito l'accelerazione è la proiezione dell'accelerazione di gravità sul piano.

6. Due sfere di massa diversa cadono con la medesima velocità.

7. Le velocità di caduta sono uguali anche in presenza di una velocità iniziale.

8. La sequenza dei vettori velocità per la sfera 2.

La dinamica

La forza

La nozione di *forza* si può acquisire mediante il concetto di *sforzo muscolare*: ogni azione originata da uno sforzo muscolare prende infatti il nome di *forza*. Ecco alcuni esempi: con uno sforzo muscolare si può lanciare una palla (→ 1a), oppure sostenere un corpo pesante (→ 2).

Nel primo dei due casi, lo sforzo muscolare produce una alterazione dello stato di riposo della palla, nel secondo esso impedisce il movimento di caduta del corpo pesante. Lo stato di moto di una palla si può anche alterare invertendo il verso del suo movimento, come avviene nel gioco del tennis, dove lo sforzo muscolare produce infatti il movimento della racchetta (→ 1b).

Da questi semplici esempi si può dedurre che si dice *forza qualsiasi causa capace di alterare lo stato di riposo o di moto di un corpo.*

L'applicazione di uno sforzo muscolare implica una direzione e un verso, oltre che una maggiore o minore intensità. Le forze sono pertanto *grandezze vettoriali*. In proposito prendiamo in considerazione quanto viene qui illustrato in → 3.

Se a un corpo, inizialmente in stato di quiete, viene applicata una forza **F**, esso si mette in movimento nella direzione e nel verso della stessa (→ 3a); se invece si applicano al corpo due forze uguali e contrarie (→ 3b), la forza risultante è nulla e non si ha moto.

Infine, due forze $\mathbf{F}_1$ ed $\mathbf{F}_2$, applicate allo stesso corpo (→ 3c), producono un'accelerazione la cui direzione è data dalla direzione della forza risultante.

L'analisi di questi esempi porta a concludere che varie forze, applicate simultaneamente su un corpo, possono essere sostituite dalla loro risultante vettoriale.

Per misurare l'intensità di una forza, si ricorre al *dinamometro*, uno strumento semplicissimo, costituito essenzialmente da una molla graduata. È noto infatti che con l'allungamento di una molla si sviluppa una forza tanto maggiore quanto maggiore è la sua deformazione.

Quando la forza della molla è uguale a quella applicata, la somma di queste due forze è nulla, e la molla rimane in equilibrio (→ 4). Un dinamometro si ottiene graduando la molla e facendo corrispondere una particolare forza ad ogni allungamento.

Momento di una forza

Si dice *momento* (**M**) di una forza rispetto a un punto una grandezza vettoriale perpendicolare al piano determinato dalla forza e dal punto; la direzione è data dal verso di avanzamento di una vite destrorsa che gira nel senso indicato dalla forza; il modulo è dato dal prodotto del modulo della forza per la distanza del punto dalla retta di azione della forza (→ 5).

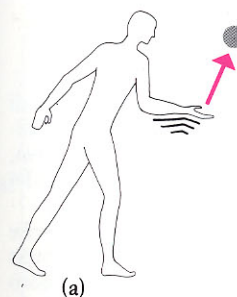
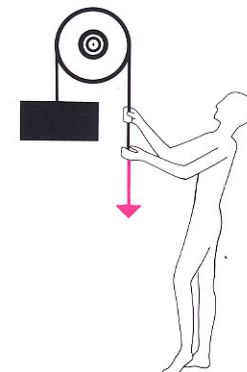
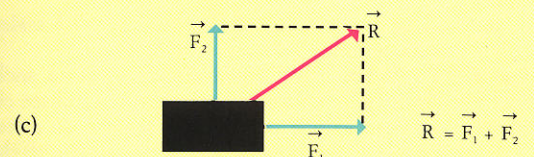
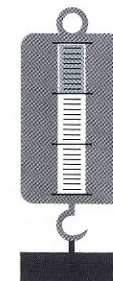
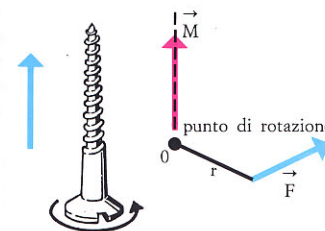
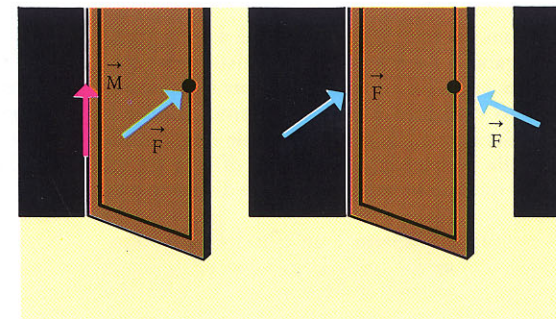
Il concetto di "momento" acquista particolare importanza nel caso di sistemi che si muovano attorno a un punto o a un asse. Se, ad esempio, si applica una forza alla maniglia di una porta, si provoca la rotazione di questa intorno al suo asse. Se la stessa forza viene applicata invece in modo che il vettore forza *attraversi* l'asse, non si può avere la rotazione. In questo caso infatti $r = 0$ (→ 6).

Coppia di forze

Quando a un corpo si applicano due forze della stessa retta d'azione e di modulo uguale ma di verso opposto, i loro effetti si equivalgono: a meno che il corpo non sia deformabile, è come se non gli venga applicata forza. Se invece le due forze non hanno la stessa retta d'azione, i loro momenti, rispetto a un qualsiasi punto, sono tali che il momento risultante è costituito da un vettore perpendicolare al piano determinato dalle forze, diretto nel verso di avanzamento di una vite destrorsa che gira nel senso indicato dalla coppia delle forze, con modulo uguale al prodotto della distanza tra le due rette di azione per il modulo comune delle stesse forze.

Si può dimostrare che l'effetto non cambia, sia che si applichi a un corpo un sistema di forze qualsiasi, sia che ad esso si applichi una forza e una coppia di forze. La forza risulta uguale a quella che si ottiene con la somma vettoriale di tutte le forze.

Supposto che la detta forza sia applicata a un punto determinato, la coppia di forze avrà un momento uguale alla somma vettoriale dei momenti di tutte le forze rispetto al punto prescelto.

La forza e il suo momento

1. Esempi di sforzi muscolari.

2. Lo sforzo muscolare contro la caduta del peso.

3. Sistemi di forze. **R** dà la risultante.

4. L'intensità di una forza misurata con il dinamometro.

5. La rotazione di una vite destrorsa nel verso della forza determina la direzione del momento angolare.

6. Una porta ruota intorno al proprio asse se la forza applicata ha momento non nullo (a sinistra). Se il momento è nullo la porta non gira (a destra).

La dinamica studia le relazioni esistenti fra le forze e i movimenti. I princìpi fondamentali della dinamica sono enunciati dalle "leggi di Newton" che forniscono, per quasi tutte le situazioni ordinarie, una descrizione corretta dei sistemi fisici e in particolare per i corpi macroscopici, ma devono essere modificate quando si riferiscono a distanze estremamente piccole o a velocità molto grandi. Le differenze tra previsione e osservazione, che si rilevano in questi casi, hanno permesso di sviluppare le teorie della meccanica quantistica e della relatività.

Prendiamo un metro, un cronometro e un dinamometro e usiamoli per misurare la forza necessaria a far muovere un piccolo mezzo di trasporto (il cronometro e il metro misurano, in effetti, l'accelerazione).

Sperimentalmente si può così osservare che, quale possa essere la forza applicata, il quoziente fra questa e l'accelerazione è costante: raddoppiando la forza, si raddoppia anche l'accelerazione e via dicendo (→ 1a). *Le forze sono proporzionali alle accelerazioni che producono.*

Poiché il quoziente fra la forza e l'accelerazione non cambia, è evidente che esso non dipende né dalla forza né dalla accelerazione, ma solo dal corpo.

Se infatti carichiamo il mezzo con un peso e ripetiamo le misurazioni, avremo, tra forza e accelerazione, un quoziente diverso ma sempre costante (→ 1b).

Il valore del quoziente fra forza e accelerazione si deve considerare una quantità caratteristica del corpo a cui è applicata la forza: a tale quoziente si dà il nome di *massa inerziale* del corpo.

Abbiamo perciò $F/a = m$, dove F è la forza applicata, a l'accelerazione acquistata dal corpo, m la massa. A parità di forza applicata, quanto maggiore è la massa, tanto minore è l'accelerazione. La massa inerziale è una misura della resistenza quale viene offerta da un corpo quando se ne alteri lo stato di quiete o di moto.

Il campione di massa è un cilindro di platino-iridio (conservato nell'Ufficio Internazionale di pesi e misure di Sèvres, in Francia). La massa di questo campione, pari a quella di un litro di acqua distillata a 4 °C, si dice *chilogrammo* (kg) e la millesima parte di questo *grammo* (g).

Leggi di Newton

In relazione agli esperimenti e alle analisi di precedenti ricercatori e in particolare di Galileo, Newton riuscì a sintetizzare, nei *Principia*, una descrizione completa della dinamica dei corpi in moto.

La "prima legge" della dinamica, detta anche "principio di inerzia", stabilisce che un corpo permane nel suo stato di quiete, o di moto rettilineo uniforme, se non viene sollecitato da forze esterne.

In termini matematici: $\mathbf{F} = 0$, ossia $\mathbf{a} = 0$, ovvero $\mathbf{v} = \text{cost}$ (→ 2).

La "seconda legge" della dinamica stabilisce qualitativamente e quantitativamente come le forze intervengono sul moto di un corpo. Tra il vettore forza e il vettore accelerazione esiste una relazione di proporzionalità, che può essere scritta:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

dove m è la costante di proporzionalità scalare caratteristica del corpo (→ 3).

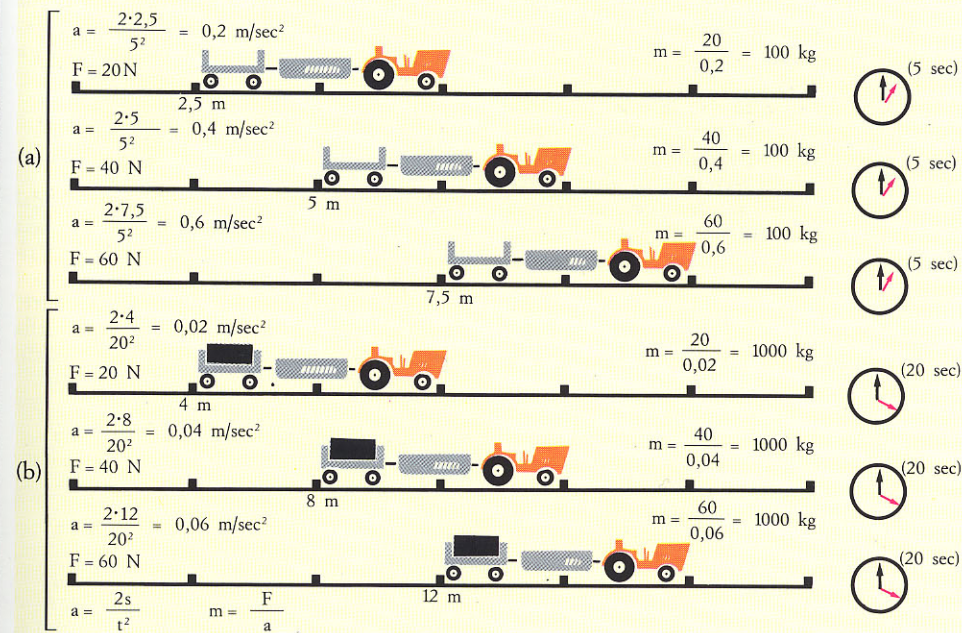
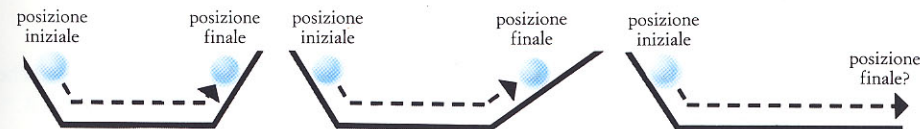
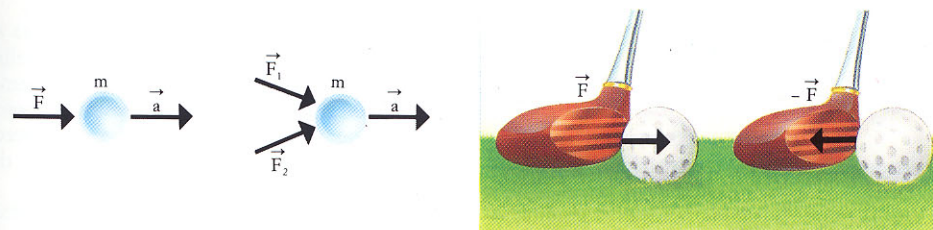
La "terza legge" della dinamica, detta anche "principio di azione e reazione", stabilisce che ad ogni azione corrisponde sempre un'azione uguale e contraria: le azioni reciproche di due corpi sono sempre uguali e dirette in versi opposti.

In termini matematici:

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

Nell'urto fra una palla e una mazza da golf la forza esercitata sulla mazza dalla palla è uguale e opposta a quella esercitata sulla palla dalla mazza (→ 4). Da notare che l'azione non è annullata dalla reazione, poiché le forze sono applicate a corpi diversi.

Nel sistema MKS l'unità di forza è il *newton* (N), corrispondente alla forza che applica a una massa di un kg una accelerazione di 1 m/sec²; nel sistema cgs l'unità di forza è la *dina*, pari alla forza che comunica a una massa di 1 grammo l'accelerazione di 1 cm/sec².

La forza e l'accelerazione

1. La forza e l'accelerazione impressa a un corpo dalla forza stessa sono proporzionali.

2. Se l'attrito è trascurabile, la palla torna al punto di partenza qualunque sia la pendenza del piano. Quando questa è nulla, si ha un moto infinito.

3. L'accelerazione ha la direzione della forza risultante applicata all'oggetto.

4. La forza esercitata dalla mazza sulla palla è uguale e contraria alla forza esercitata dalla palla sulla mazza.

La gravitazione

Gli oggetti in caduta libera in prossimità della superficie terrestre hanno una accelerazione di 9,8 m/sec^2. Newton si interessò alla cosa e studiò, in particolare, il sistema Terra-Luna, ipotizzando che la forza che tiene la Luna nella sua orbita intorno alla Terra avesse la stessa natura di quella che attrae gli oggetti in prossimità della superficie terrestre; in altre parole egli proponeva che l'accelerazione centripeta della Luna, che le permette di ruotare intorno alla Terra, fosse dovuta all'attrazione gravitazionale della Terra stessa (→ 1).
L'accelerazione centripeta della Luna – a quanto stabilì Newton – è più piccola del valore di g sulla superficie della Terra di un fattore: $a_c/g = 1/3600 = 1/(60)^2$.
Essendo la distanza della Luna dal centro della Terra pari a circa 60 volte la distanza di un oggetto situato sulla superficie terrestre, Newton suppose che la forza di gravità fosse inversamente proporzionale al quadrato della distanza dei due corpi. L'ipotesi era valida anche per il moto dei pianeti.
La forza gravitazionale che due particelle o due corpi sferici esercitano l'uno sull'altro è inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra i loro centri, e direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse.
L'enunciato suppone che le dimensioni dei corpi siano, rispetto alle distanze che li separano, molto piccole, in modo da essere considerati come oggetti puntiformi. In termini matematici:

$$F = K \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

dove F è il modulo della forza di attrazione gravitazionale; m_1 e m_2 sono le masse dei due corpi che si attraggono; d è la distanza che li separa; K è una costante universale che dipende soltanto dal sistema di unità di misura prescelto (→ 2).

La gravità terrestre

Quando uno dei corpi in attrazione reciproca è la Terra e l'altro un corpo assai più piccolo a breve distanza da questa, la forza di gravitazione è detta *peso* del corpo, l'attrazione *gravità terrestre*. Nell'equazione, m_1 è la massa della Terra ($m_1 = 5{,}97 \times 10^{24}$ kg). Dividendo la forza **F** che si esercita su un corpo per la sua massa m_2, avremo, in base alla legge di Newton, l'accelerazione del corpo, indicata con g e chiamata *accelerazione di gravità*:

$$g = \frac{F}{m_2} = \frac{km_1}{d^2}$$

dove d è la distanza del corpo di massa m_2 dal centro della Terra, tenuto conto che la massa della Terra è distribuita simmetricamente rispetto al centro.
Per un punto prossimo alla superficie terrestre, d è uguale, per approssimazione, al raggio della Terra e l'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre è pari a:

$$g_0 = \frac{km_1}{R^2}$$

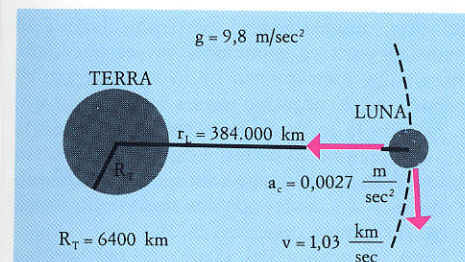
il cui valore è, in misura approssimata, 9,8 m/sec^2.
Un satellite artificiale gira attorno alla Terra, seguendo un'orbita circolare di raggio d; il suo peso è la forza centripeta che dà origine al moto circolare; g è l'accelerazione centripeta, pari al quadrato della velocità lineare diviso per il raggio dell'orbita: $g = v^2/d$ (→ 3, 4).
Avremo quindi:

$$v = \sqrt{gd}$$

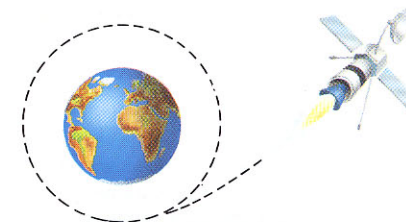
Ne consegue che la velocità di un satellite che gira a piccola altezza (d = R = 6400 km; g = = 9,8 m/sec^2) è di 7,9 km/sec.
Dividendo, membro a membro, le espressioni ottenute per g e g_0, si ha:

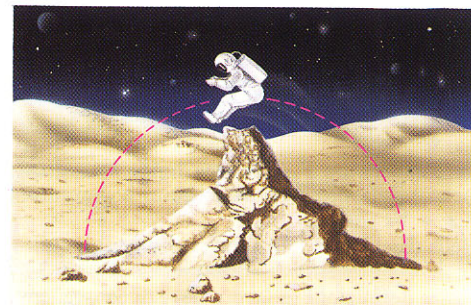
$$\frac{g}{g_0} = \frac{R^2}{d^2}$$

da cui si ricava che l'accelerazione di gravità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal centro della Terra. Così, ad esempio, a 6400 km di altezza i corpi hanno un peso pari alla quarta parte del peso che avrebbero sulla superficie terrestre: g è la quarta parte di 9,8 m/sec^2 (→ 5, 6).
Il chilogrammo-forza si definisce come *la forza con cui la Terra attrae una massa di un kg, collocata in un luogo dove l'accelerazione di gravità è 9,80665 m/sec^2.*

Il campo di gravità

1. L'attrazione gravitazionale della Terra determina l'accelerazione centripeta della Luna.

2. Le forze di interazione gravitazionale tra due corpi formano una coppia di azione-reazione.

3. I razzi propulsori spingono il satellite nell'orbita prevista. A questo punto termina la loro attività: il satellite permane in orbita per la forza di gravità terrestre.

4. Raggiunta tangenzialmente un'orbita per cui sia soddisfatta la relazione $v^2/r = g$, il satellite rimane attorno alla Terra nella medesima orbita.

5. Campo gravitazionale terrestre: i vettori rossi rappresentano modulo e direzione del campo gravitazionale sulla superficie. I vettori blu sono riferiti a un'altezza di $3 \cdot 10^6$ m; i verdi a un'altezza di $6 \cdot 10^6$ m.

6. La massa della Luna è un sesto circa di quella della Terra. Sulla Luna la forza di gravità è dunque un sesto di quella della Terra. Ciò significa che, a parità di sforzo muscolare, un salto compiuto sulla Luna risulta sei volte più alto che sulla Terra.

Lavoro e energia

Il concetto di "energia" è strettamente legato all'idea di "lavoro". Taluni modi di dire che ci suonano familiari perché ci accompagnano da sempre ("fai un buon pasto e avrai energia", "chi ha energia fa molto lavoro") rispondono in effetti a sicuri princìpi scientifici. Come questi: l'energia chimica delle sostanze alimentari può essere trasferita ai sistemi biologici, oppure: l'energia è la capacità di compiere lavoro.

Il lavoro

Se si applica una forza ad un oggetto e lo si muove per una certa distanza, si afferma che si è compiuto un "lavoro". Se si sollecita un oggetto qualsiasi, lungo una superficie che fa resistenza, con una forza che vince l'attrito e sposta l'oggetto in questione lungo una distanza s, si esegue un "lavoro".

"Lavoro" è dunque il prodotto di una forza applicata a un corpo da un agente esterno per la distanza su cui quella forza agisce sul corpo. In → 1 la direzione dello spostamento coincide con la direzione della forza applicata, mentre il lavoro eseguito dalla forza **F** per muovere la massa m di una distanza s è:

$$L = Fs$$

In → 2 invece la direzione della forza forma, con la direzione del moto, un angolo θ. Questa forza può essere considerata come la somma vettoriale di due forze indipendenti (le componenti x e y):

$$F_x = F_{\cos\theta}$$
$$F_y = F_{\text{sen}\theta}$$

La componente F_x è diretta lungo lo spostamento; il lavoro da essa eseguito è pertanto: $F_x s = Fs \cos\theta$.

Nella direzione y non si ha spostamento; quindi, la componente F_y non esegue lavoro. La nostra definizione di lavoro deve di conseguenza risultare: *il lavoro è il prodotto della forza nella direzione dello spostamento per il valore dello spostamento prodotto dalla forza.*

Da questa definizione possiamo dedurre: 1. il lavoro è nullo, se è nullo lo spostamento, o se è nulla la forza, o se, non essendo nulli nessuno dei due, sono fra loro perpendicolari; 2. il lavoro è positivo quando la proiezione della forza sullo spostamento ha lo stesso verso di questo, ed è negativo se ha verso opposto; 3. quando la forza e lo spostamento hanno la stessa direzione, il lavoro è uguale al prodotto del modulo della forza per lo spostamento, con il segno + o −, a seconda che siano dello stesso verso o di verso opposto (→ 3).

L'unità di misura del lavoro è, nel sistema MKS, il *joule* (J), cioè *il lavoro che effettua una forza di un* N *per spostare il suo punto di applicazione di un* m *nella sua stessa direzione e verso*. Se, invece della forza di un N, si considera una forza di un chilogrammo-peso, l'unità è il chilogrammetro (kgm), che corrisponde a 9,8 J. Nel sistema cgs, l'unità è l'erg.

L'energia

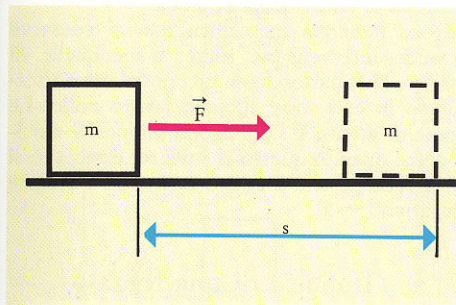
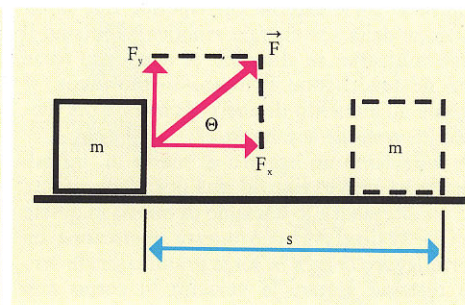
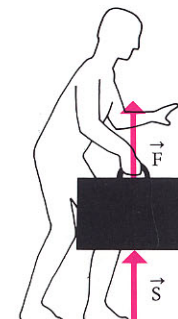
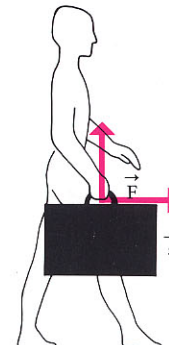
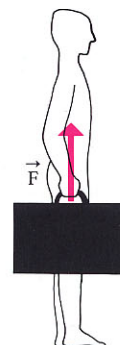
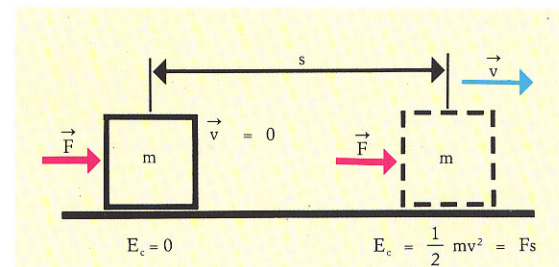
Si dice che un corpo, o un sistema di corpi, possiede *energia* quando è in grado di effettuare un lavoro.

Osserviamo l'illustrazione (→ 4): un'automobile che urta contro una palizzata non fa danno, se procede a velocità modesta, poiché non ha la capacità di compiere il lavoro necessario a vincere le forze di coesione della barriera, ha invece questa capacità se urta la palizzata a velocità elevata. L'automobile dunque possiede, in virtù della velocità, un'energia che si trasforma in lavoro al momento dell'urto.

Passiamo alla illustrazione successiva (→ 5), dove è preso in considerazione un oggetto inizialmente in stato di quiete. Se gli si applica una forza costante **F**, l'oggetto accelera; dopo che ha percorso una distanza s, acquista una velocità v = at (trascurate le forze di attrito). La distanza percorsa è $s = 1/2\ at^2$, quindi:

$$L = Fs = (ma)\left(\frac{1}{2}at^2\right) = \frac{1}{2}m(at)^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

In questo caso dice che l'oggetto ha acquistato una quantità di energia pari a $1/2\ mv^2$. L'energia acquisita da un oggetto in virtù del suo moto è detta *energia cinetica*; essa dipende non solo dalla velocità, ma anche dalla massa. È dimostrato che l'energia cinetica rappresenta il lavoro massimo realizzabile da un corpo in

Il lavoro e il teorema delle forze vive

1. Se forza e spostamento hanno direzione e verso uguale, il lavoro è dato da L = Fs.

2. Se forza e spostamento hanno direzioni diverse, il lavoro è compiuto soltanto dalla componente della forza nella direzione dello spostamento L = F s cosθ.

3. Chi fa lavoro? Non il primo uomo, che non solleva il peso e non lo depone; non il secondo: forza e spostamento hanno direzioni perpendicolari. Fa lavoro il terzo uomo: forza e spostamento hanno direzione uguale.

4. L'automobile vince le forze di coesione della palizzata se è dotata di velocità sufficiente.

5. Un corpo inizialmente in quiete e sottoposto a una forza compie uno spostamento in direzione di questa. Il lavoro è uguale all'energia cinetica acquistata dal corpo: $L = Fs = 1/2\ mv^2$.

seguito al suo stato di moto, e che al lavoro contro le forse esterne corrisponde una diminuzione della sua energia cinetica. Vediamo il caso contrario: se al mobile si applicano forze che ne favoriscono il moto, il loro lavoro è uguale all'aumento di energia cinetica del mobile (*teorema delle forze vive*).
Se solleviamo un oggetto di massa m, inizialmente in quiete, fino ad una posizione situata ad un'altezza h e lo lasciamo di nuovo in quiete (→ 1), realizziamo con questa operazione un certo lavoro contro la forza gravitazionale senza tuttavia variare la velocità: il corpo non aquista infatti energia cinetica. Esso possiede peraltro energia in virtù della posizione; se infatti lasciamo cadere l'oggetto dall'altezza h, questo la trasforma in energia cinetica.
Ogni corpo, nel campo gravitazionale terrestre, possiede una *energia potenziale*: il lavoro eseguito contro la forza gravitazionale viene immagazzinato e conservato sotto forma di energia potenziale (→ 2).
Un'altra illustrazione (→ 3) dà un semplice esempio di energia cinetica trasformata in energia potenziale, e viceversa. Una massa m scivola su un piano senza attrito e con velocità costante v_o e va ad urtare contro una molla. Compressa nell'urto, questa esercita una forza sulla massa e ne provoca il rallentamento. Questa forza non è costante: in buona approssimazione, essa è proporzionale al valore x di deformazione della molla (*legge di Hooke*). L'energia cinetica della massa diminuisce, fino ad annullarsi, quando la velocità si annulla e la molla è al massimo della compressione: x = d: a questo punto, tutta l'energia è immagazzinata come energia potenziale della molla. Successivamente, la massa acquista velocità nella direzione opposta, fino ad abbandonare la molla con il modulo della velocità pari a v_0 ed energia cinetica pari a quella iniziale: tutta l'energia cinetica perduta durante la compressione è stata riguadagnata. *L'energia meccanica, data dalla somma dell'energia cinetica più l'energia potenziale, si conserva durante il processo.*
A questo risultato si perviene ogni volta che le forze che intervengono sono *forze conservative* caratterizzate dalla proprietà per cui la quantità di lavoro compiuto dipende soltanto dalla posizione iniziale e finale del loro punto di applicazione (e non già dal cammino percorso durante il processo). La forza gravitazionale è un esempio di forza conservativa (→ 4), come la forza di richiamo della molla.
Invece l'energia meccanica non si conserva quando intervengono forze, come quelle di attrito, che, partendo da una posizione e ritornando in essa, non abbiano lavoro nullo. Le forze di attrito si oppongono sempre al movimento: quando questo si inverte, esse pure si invertono per cui il lavoro realizzato è sempre negativo (→ 5).

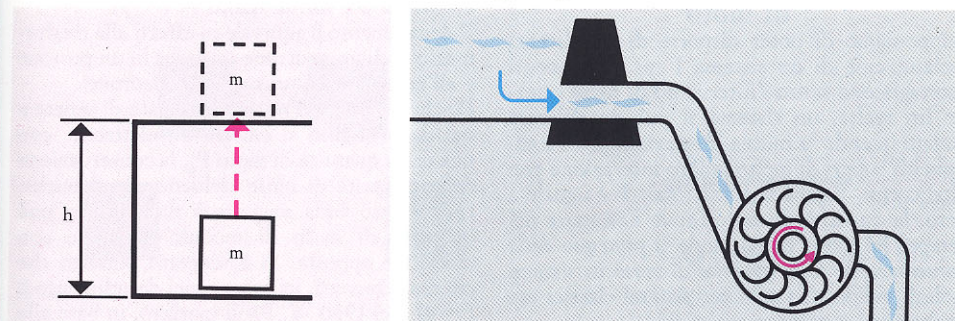
Impulso di una forza e quantità di moto

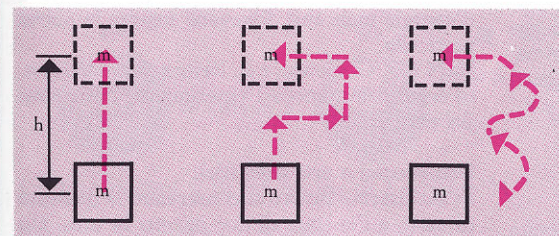
Quando a una massa m si applica una forza si provoca un'accelerazione. Quanto più lungo è il tempo in cui l'accelerazione è diversa da zero, tanto maggiore è la variazione di velocità. Si definisce così una grandezza in cui, insieme alla forza, intervenga il tempo (il tempo in cui esiste accelerazione) quando la forza è diversa da zero. Questa grandezza è l'*impulso della forza*, che si definisce come un vettore di uguale direzione e verso della forza, con modulo dato dal prodotto della forza per il tempo in cui essa agisce.
Se una persona viene colpita con un oggetto di 30 g che si muove a una velocità di 1 m/sec, è possibile che questa persona non avverta l'urto: l'effetto è altro se l'urto è provocato da un corpo che si muove alla stessa velocità (1 m/sec) ma che abbia massa assai maggiore (un'auto, ad esempio).
La massa del mobile ha, quindi, una notevole importanza sul risultato.
D'altra parte, anche la velocità riveste un ruolo importante: un proiettile, di massa piccola, ma che procede a 400 m/sec, può uccidere una persona. Perciò definiremo la *quantità di moto* di un corpo come un vettore di uguale direzione e verso della velocità, con modulo uguale al prodotto della massa per il modulo della velocità: $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$.
Se la forza $\mathbf{F}$ agisce durante il tempo t, originando un'accelerazione $\mathbf{a}$, la velocità varia durante il tempo Δt di $\mathbf{a}\Delta t$: in base alla legge di Newton, ciò rappresenta una variazione della quantità di moto pari a:

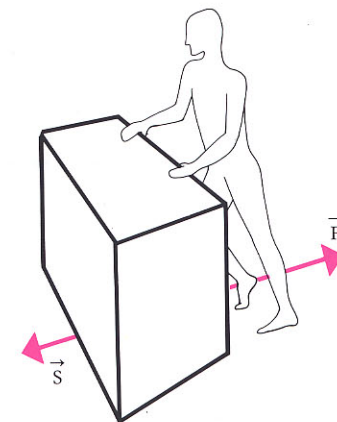
$$m\Delta\mathbf{v} = m\mathbf{a}\Delta t = \mathbf{F}\Delta t$$

L'impulso di una forza è uguale pertanto alla variazione della quantità di moto.

MECCANICA

Lavoro e energia potenziale

1. Un oggetto, portato a altezza h, ha un'energia potenziale pari a mgh.

2. Cadendo verso il basso, l'acqua compie lavoro perché possiede una energia potenziale.

4. Il lavoro che si compie per portare un corpo di massa m a un'altezza h dal suolo, è uguale a mgh, senza considerare il percorso.

3. Trasformazione di energia cinetica in energia potenziale:
a. la massa m verso la molla;
b. inizia la compressione;
c. la velocità ridotta a v dopo compressione x;
d. compressione massima: v = 0 (energia cinetica in energia potenziale);
e. la massa m accelera, la molla rende energia;
f. la molla è scarica; la massa riacquista la velocità iniziale con verso opposto;
g. massa m indipendente.

5. Le forze di attrito resistono agli spostamenti (il lavoro è negativo).

Conservazione della quantità di moto

Supponiamo di poter disporre di un sistema isolato, cioè di un sistema i cui componenti interagiscono senza l'intervento di forze esterne (in realtà, un sistema si può considerare isolato quando la mutua interazione fra i componenti superi di molto la loro interazione con altri corpi). Poiché la forza totale **F** è uguale a zero, la quantità di moto totale non varia nel tempo: ha luogo in tal modo il *principio della conservazione della quantità di moto* in sistemi isolati, valido non solo per sistemi classici ma anche per i sistemi quantistici.
In → 1, abbiamo due masse in quiete collegate da una molla in compressione; in questa situazione, se si trascurano la massa della molla e l'attrito, la quantità di moto totale del sistema è nulla e, trattandosi di sistema isolato, la legge di conservazione impone che tale debba rimanere. Con la liberazione della molla, gli oggetti si allontanano l'uno dall'altro a velocità $\mathbf{v}_1$ e $\mathbf{v}_2$. Perciò:

$$0 = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 \rightarrow m_1\mathbf{v}_1 = -m_2\mathbf{v}_2$$

dove il segno negativo indica che le velocità hanno orientazione opposta.
Passiamo all'illustrazione successiva (→ 2): anche in uno sparo non intervengono forze esterne al sistema (l'arma) per cui si conserva la quantità di moto. Prima dello sparo **P** è uguale a zero, poiché fucile e proiettile sono a riposo; dopo lo sparo abbiamo ancora **P** = 0: il proiettile ha una quantità di moto diretta in avanti, mentre l'arma deve avere una quantità di moto MV diretta in senso opposto e di uguale valore; ossia l'arma ha un rinculo con velocità:

$$V = \frac{mv}{M}$$

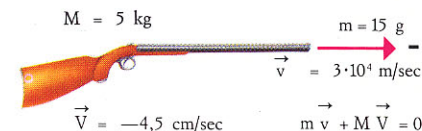
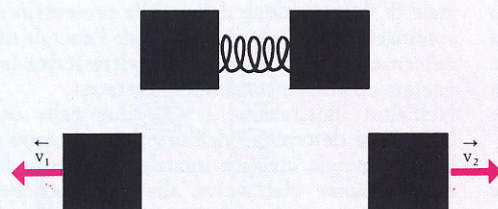
dove m e **v** sono la massa e la velocità del proiettile, M la massa dell'arma.

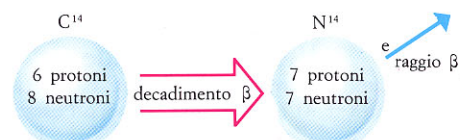
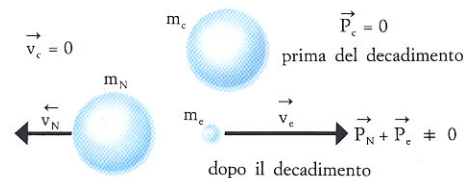
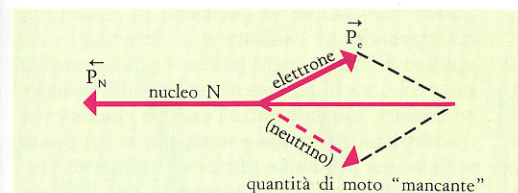
La scoperta del neutrino

Uno dei maggiori successi, ottenuti grazie ai princìpi di conservazione, è stata la scoperta di una particella elementare: il *neutrino*.
Alcune sostanze, come vedremo in seguito, possiedono una radioattività naturale: il nucleo del Carbonio 14, decade, ad esempio, per emissione β e forma Azoto 14 (→ 3).
Il decadimento β equivale in effetti alla trasformazione di un neutrone nucleare in un protone e all'emissione di un raggio β (*elettrone*).
Poiché all'inizio il nucleo è in stato di quiete e nel decadimento si emette un elettrone, con una certa quantità di moto $\mathbf{P}_e$, la conservazione della quantità di moto richiede che il nucleo trasformato vada soggetto a rinculo, con una quantità di moto di modulo uguale e con direzione opposta. Si è scoperto peraltro che ciò non era vero, in genere, nel decadimento β (→ 4); nel 1930 W. Pauli ipotizzò, in base alle leggi di conservazione, l'esistenza di una nuova particella elementare, il *neutrino*, emesso nel decadimento insieme all'elettrone (→ 5). Secondo questa ipotesi, la quantità di moto e d'energia mancanti dovevano seguire la nuova particella.
Nel 1953, C. Cowan e F. Reines dimostrarono, in seguito a numerosi esperimenti, l'esistenza del neutrino.

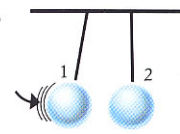
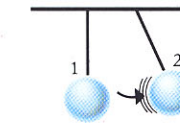
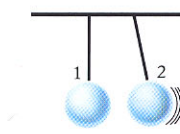
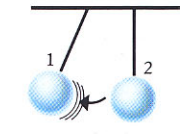
Urti elastici e urti anelastici

In un sistema isolato si conservano la quantità di moto e l'energia di due oggetti in urto. Un corpo però possiede, oltre all'energia cinetica, anche un'*energia interna*, dovuta al moto relativo degli atomi o delle molecole che lo costituiscono. Perciò, in un sistema isolato, non si conserva solo l'energia cinetica, ma anche l'energia totale.
Un aumento dell'energia interna di un corpo porta a un aumento della sua temperatura. Se una parte di energia cinetica si converte in energia termica, l'urto è detto *anelastico*.
Un urto anelastico è, in genere, un urto in cui ha luogo una variazione dell'energia interna di uno o di entrambi gli oggetti che interagiscono; l'urto è invece *elastico*, se non avviene alcuna variazione d'energia interna. In → 6 sono rappresentate due sfere rigide oscillanti; se lasciamo cadere una delle due da una determinata altezza, questa urta con l'altra inizialmente ferma. Dopo l'urto, essendo le due sfere identiche, la prima si ferma e trasmette tutta la sua energia cinetica all'altra; nel caso di urto elastico, questa raggiunge l'altezza da cui l'altra era partita. Se gli urti fra le due sfere fossero realmente elastici, si avrebbe un moto perpetuo, con conservazione dell'energia meccanica (senza incremento dell'energia interna).

La conservazione della quantità di moto

1. La relazione fra le velocità delle due masse è data dalla legge di conservazione della quantità di moto.

2. Fucile e proiettile sono un sistema isolato: dopo lo sparo hanno quantità di moto uguali e opposte.

3. Decadimento β di un nucleo di Carbonio 14.

4. Il nucleo è un sistema isolato: perso un elettrone per decadimento di tipo β, dovrebbe acquistare una quantità di moto uguale e opposta a quella dell'elettrone...

5. ... in realtà, le quantità di moto dell'elettrone e del nucleo non hanno la stessa direzione. Tuttavia, la quantità di moto totale è nulla. Il nucleo emette infatti una particella: il neutrino.

a. posizione iniziale;

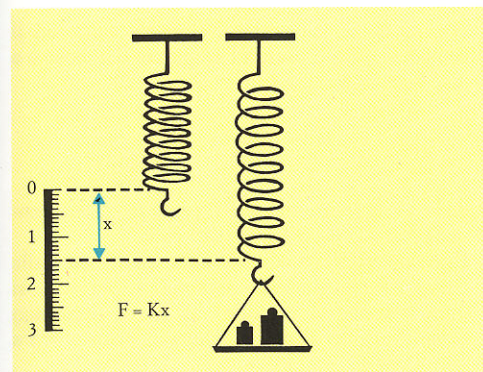
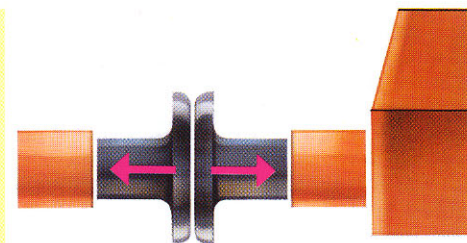
b. la sfera 1 urta contro la sfera 2;

c. la sfera 1 è ferma; la 2 al punto di partenza della 1;

d. inversione di moto: la 2 urta la 1;

e. la 1 in posizione iniziale.

6. Moto perpetuo di due sfere rigide oscillanti in assenza di forze di attrito.

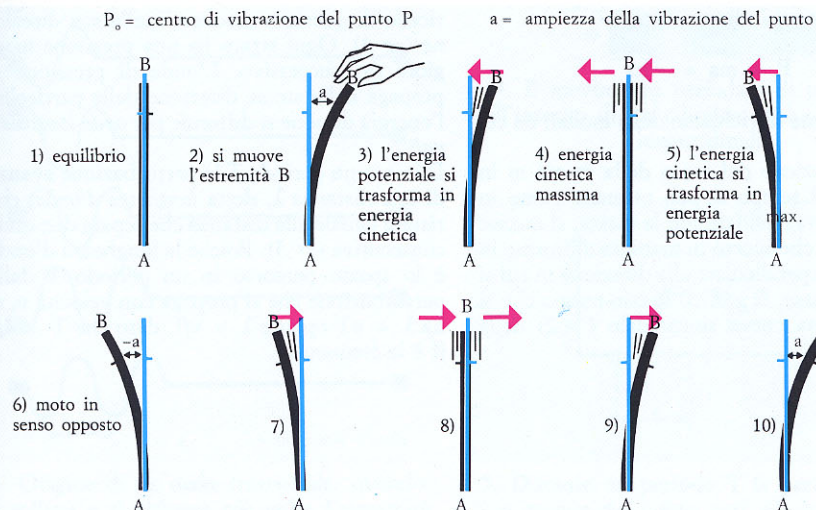
L'elasticità

Per arrivare a deformare un corpo, è necessario applicare sullo stesso una forza di modulo conveniente; se il corpo, cessata l'azione della forza, recupera la forma primitiva, diciamo che è un *corpo elastico*; in tal caso la deformazione si dice *deformazione elastica* ed è *proporzionale alla forza applicata* (legge di Hooke).
I corpi non sono mai perfettamente elastici: se la deformazione supera un certo valore (*limite di elasticità*), le forze cessano di essere proporzionali alle deformazioni; inoltre, a causa della loro azione, si ha una deformazione residua del corpo; aumentando la forza deformante, si arriva al *limite di rottura*, quando cioè il corpo si rompe.
La legge di Hooke ha valore solo se si prendono in considerazione deformazioni piccolissime. Rappresentiamo con F l'agente deformatore (ad es., una forza di pressione) e con x la deformazione; la legge di Hooke si esprime con $F = kx$, dove k è una costante di proporzionalità tipica del corpo (→ 1).
Per il principio di azione e reazione il corpo contrappone, alla forza deformante, una forza uguale e contraria: in altre parole, dalla deformazione di un corpo viene generata una forza elastica.
Nel corso della deformazione la forza sposta il proprio punto di applicazione, compie cioè un lavoro, che, se il corpo è elastico, resta immagazzinato come energia potenziale di deformazione. Tale energia ritorna poi a convertirsi in lavoro, quando il corpo recupera la forma iniziale.
Il caso della molla compressa dalla massa m, visto a proposito della conservazione dell'energia meccanica, è un esempio di deformazione elastica.
Quando un corpo subisce una deformazione x, il modulo della forza che l'ha determinata passa da 0 a kx, per cui il valore medio della forza è dato da $kx/2$. Il lavoro effettuato dalla forza si può calcolare moltiplicando questo valore medio per lo spostamento x del punto di applicazione: $kx^2/2$. Questo è anche il valore dell'energia potenziale corrispondente a una deformazione x.
Osserviamo le illustrazioni (→ 2, 3). Nella prima si osserva come l'energia cinetica porta il treno in arrivo a urtare contro i respingenti; l'energia cinetica si trasforma in energia potenziale di deformazione delle molle presenti nei respingenti. Alla partenza del treno l'energia di deformazione dei respingenti si ritrasforma in energia cinetica e collabora al distacco.
Nell'altra illustrazione (→ 3), due palle da biliardo si deformano nell'urto, trasformando la loro energia cinetica iniziale in energia di deformazione, che arriva alla deformazione massima quando le palle vengono a contatto. L'energia di deformazione diminuisce, quando le palle si allontanano dalla posizione di contatto, e si trasforma in energia cinetica. Ritornate alla forma primitiva, le palle si separano; l'energia potenziale di deformazione ora è nulla e l'energia cinetica è costante.

Vibrazioni e onde

Fissiamo l'estremità A di una bacchetta di acciaio (→ 4) e spostiamo un poco l'estremità libera (B) dalla posizione di equilibrio: lasciando andare, la bacchetta prende a vibrare. Muovendo l'estremità B dalla posizione di equilibrio, si produce quindi nella bacchetta una deformazione, con conseguente comunicazione di una energia potenziale di deformazione. Le forze elastiche sviluppate dalla deformazione tendono a portare i vari punti della bacchetta, quando questa sia rilasciata, alla loro posizione di equilibrio, mentre l'energia potenziale di deformazione si trasforma in energia cinetica.
Con la bacchetta tornata in posizione di equilibrio, l'energia potenziale di deformazione diventa nulla: in questa posizione l'energia cinetica può dirsi massima e uguale all'energia di deformazione comunicata all'inizio. La bacchetta non rimane in posizione di equilibrio, ma riprende ad oscillare e a deformarsi. In assenza di attrito, ogni punto raggiunge così la sua posizione simmetrica rispetto alla posizione iniziale. Quando tutta l'energia cinetica si è trasformata in energia potenziale, la bacchetta prende una posizione di riposo istantaneo (velocità nulla), a cui corrisponde una energia potenziale di deformazione pari a quella iniziale. Tale posizione di riposo istantaneo è, naturalmente, simmetrica rispetto a quella iniziale. Se con a indichiamo lo spostamento di un

Le deformazioni elastiche

1. La deformazione della molla è espressa dal suo allungamento (x): la forza applicata dalla molla ai pesi è proporzionale a x.

2. Un treno contro i respingenti... la sua energia cinetica si trasforma in energia potenziale di deformazione delle molle... il treno si ferma.

3. Nell'urto l'energia cinetica di due palle da biliardo si trasforma in energia potenziale di deformazione; poi, di nuovo, in energia cinetica di allontanamento.

4. Vibrazione di una bacchetta d'acciaio (di materiale perfettamente elastico).

punto qualsiasi dalla sua posizione di riposo, la sua energia potenziale di deformazione sarà $^1/_2$ ka^2; nella posizione 6), simmetrica rispetto all'asse, la separazione è −a, a cui corrisponde la stessa energia potenziale.
Ogni punto della bacchetta è sottoposto a una forza diretta verso la posizione di equilibrio del punto, *il centro di vibrazione*, e proporzionale, ad ogni istante, alla distanza fra il centro di vibrazione e il punto; tale distanza è detta *elongazione*.
Il valore massimo dell'elongazione è l'*ampiezza della vibrazione*, pari alla distanza tra la posizione del punto e il centro di vibrazione, quando la velocità istantanea è nulla. Il tempo che impiega il punto per effettuare una vibrazione completa da 2) fino a 10) costituisce il *periodo* del moto, definito *moto armonico semplice*.
La *frequenza* è il numero di vibrazioni nell'unità di tempo, pari al reciproco del periodo: misurando il periodo in secondi, la frequenza è data in *herz* (Hz).
In → 1 si rappresenta una massa, posta su una superficie priva di attrito, collegata a una molla elicoidale. Quando m è spostata dalla sua posizione di equilibrio, si genera una forza di richiamo data da **F** = − k**x** (il segno negativo indica che il verso della forza è opposto al verso dello spostamento). In base alla seconda equazione della dinamica, la forza deve essere uguale al prodotto della massa m per la sua accelerazione, quindi

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = -k\mathbf{x}$$

(k è la costante di richiamo della molla); da cui $\mathbf{a} = -k/m\mathbf{x}$.
Una registrazione del moto della massa m in funzione del tempo si può ottenere come in → 1: la matita, solidale con la massa, si muove su un rotolo che scorre in maniera uniforme in direzione perpendicolare alla direzione in cui si muove la massa. Il grafico spazio-tempo che si ottiene è una curva sinusoidale (→ 2) della forma

$$x = A \text{ sen } (\omega t + \varphi)$$

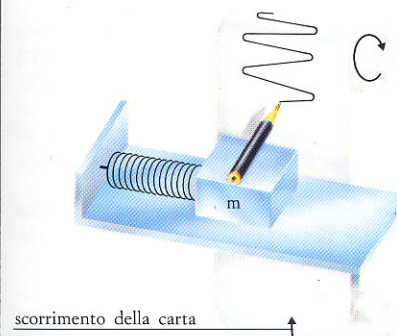
che dà la relazione tra l'elongazione x ed il tempo t (A rappresenta l'ampiezza del moto è φ è la fase iniziale, ed in → 2 φ = 0):

$$\omega = 2\pi f = 2\frac{\pi}{T}$$

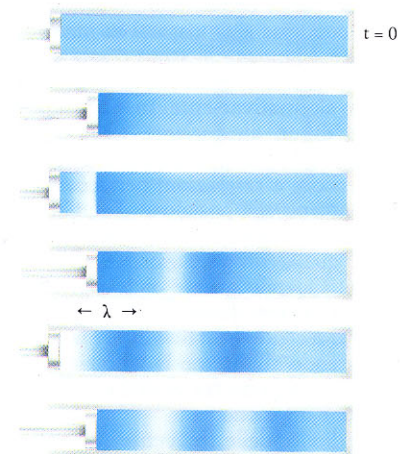
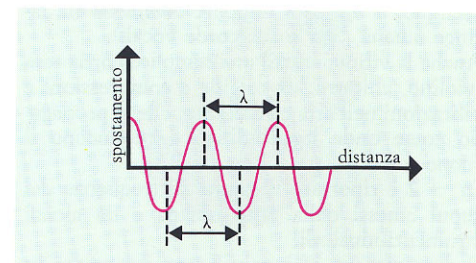
dove f è la frequenza e T il periodo, rappresenta la *pulsazione del moto armonico*.
Fra due punti qualsiasi, corrispondenti sulla curva, c'è un intervallo di tempo T (periodo); si dimostra che il periodo del moto armonico semplice di un punto di massa m, sottoposto a una forza **F** = − k**x**, è

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Moto ondulatorio
Una manifestazione del fenomeno di interazione tra il moto di particelle è il *moto ondulatorio*. Consideriamo una corda tesa (→ 3): se sollecitiamo un movimento trasversale su una estremità, l'impulso si diffonde per tutta la lunghezza. In questo esempio, l'energia si propaga per onde trasversali, in direzione perpendicolare rispetto alla vibrazione dei punti.
Un pistone che si muova con moto periodico in un cilindro comprime l'aria obbligando le particelle di questa a muoversi nella sua direzione (→ 4). Ogni strato ha una pressione maggiore del successivo. L'onda di pressione si propaga nella stessa direzione delle particelle: l'energia dunque si diffonde per *onde longitudinali*.
Durante un periodo T la perturbazione avanza di una distanza λ, detta *lunghezza d'onda*, che risulta uguale alla distanza che separa due onde consecutive (→ 5). Poiché la lunghezza d'onda è lo spazio percorso in un periodo T dalla perturbazione che si propaga con velocità v, si ha λ = vT oppure λ = v/f, dato che T = 1/f (f è la frequenza).

Vibrazioni e onde

1. Solidale con la massa, la matita segna lo spostamento.

2. Grafico spazio-tempo per un moto armonico.

3. Origine di un'onda trasversale: quando si solleva e si abbassa più volte l'estremità di una corda, la perturbazione si propaga in senso orizzontale.

4. Il movimento periodico di un pistone all'interno di un cilindro dà luogo a onde longitudinali.

5. Durante un periodo T la perturbazione si muove del tratto pari alla lunghezza d'onda λ.

L'acustica

Onde sonore

Le onde sonore costituiscono una perturbazione meccanica. Sono onde longitudinali che producono variazioni di pressione e densità nel mezzo in cui si propagano. Immaginiamo di percuotere un gong o una qualsiasi superficie libera di vibrare (→ 1); la superficie, flettendosi in avanti, comprime lo strato d'aria adiacente, che si dilata a sua volta e colpisce lo strato successivo: si genera in questo modo la prima onda sonora.

Poco dopo, la superficie del gong si fletterà all'indietro, per elasticità: anche lo strato d'aria adiacente si dilata, mentre la prima onda sonora continua a propagarsi in maniera indipendente. Dunque, gli strati d'aria a contatto con la superficie metallica si comprimono e dilatano alternativamente. In modo analogo, se il cono di un altoparlante vibra f volte al secondo, le diverse particelle d'aria subiscono f compressioni e rarefazioni per secondo, oscillando intorno alla posizione d'equilibrio, poiché la direzione di vibrazione viene a coincidere con quella di propagazione della perturbazione. Quando queste onde arrivano entro l'orecchio, vi producono f compressioni e rarefazioni al secondo e fanno vibrare la membrana trasmettendo all'interno la vibrazione: se f ha un valore compreso fra 16.000 e 20.000 Hz, si percepisce un suono.

I valori limite delle frequenze percepibili dall'uomo variano da individuo a individuo e devono considerarsi solo come indicativi; le frequenze basse corrispondono ai suoni gravi, le frequenze alte ai suoni acuti.

La sorgente sonora può essere *semplice* (ad esempio, il diapason) oppure *complessa* (la laringe umana, con le sue corde vocali).

Anche la vibrazione di una semplice corda tesa (violino, chitarra) dà origine a compressioni e vibrazioni nell'aria circostante, che si propagano come onde longitudinali e producono il suono.

In → 2 è riportato il campo di frequenza dei suoni emessi dalla voce umana e da alcuni strumenti musicali.

Il diapason (→ 3) invece è uno strumento in cui la vibrazione di tutti i punti è *armonica semplice*, ha cioè una frequenza singola. Anche le vibrazioni dei punti dello spazio sono armoniche semplici: il loro suono è detto infatti *suono puro*. Gli altri sistemi che danno suono producono in genere suoni composti, che si possono considerare come sovrapposizione di un suono puro e di altri suoni con *frequenza multipla* della prima.

Al suono base si dà il nome di *armonica fondamentale*, ai suoi multipli quello di *armoniche superiori*.

Caratteristiche del suono

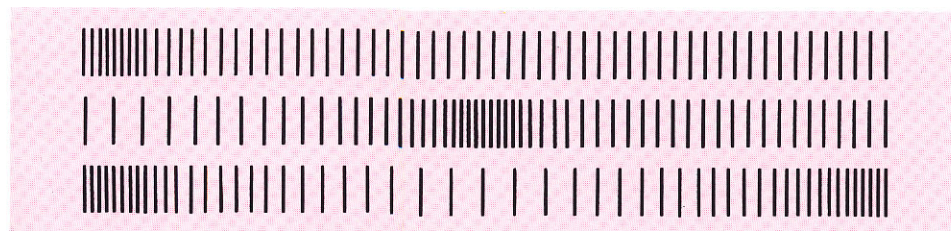
Il suono ha tre caratteristiche: *intensità, altezza* e *timbro*.

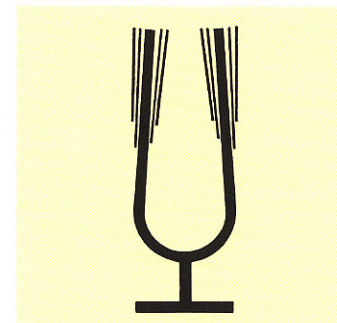
L'*intensità* distingue il suono *forte* dal suono *debole*; è una quantità fisica definita in termini di flusso di potenza, corrispondente al numero di watt al cm^2 trasmessi attraverso una superficie perpendicolare al fronte d'onda. Un suono è molto intenso quando è molto grande l'energia delle particelle del mezzo di propagazione; si dimostra infatti che tale energia è proporzionale al quadrato dell'ampiezza della vibrazione. L'intensità di un suono dipende dunque dalla sua ampiezza. L'orecchio umano arriva a percepire una vasta gamma di intensità acustiche. I rumori con intensità di circa 10^{12} volte la soglia di udibilità (→ 4) possono essere avvertiti con una sensazione di fastidio negli organi dell'udito; oltre questo livello la sensazione diventa dolorosa e può danneggiare l'orecchio non protetto.

L'*altezza* di un suono è la caratteristica che permette di distinguere tra suoni acuti e suoni gravi; essa cresce con l'aumentare della frequenza d'onda. Tale frequenza corrisponde all'*armonica fondamentale*. Due note musicali diverse si distinguono nell'altezza.

Il *timbro* di un suono è la caratteristica che ci permette di distinguere una stessa nota emessa da strumenti diversi. Un violino e una tromba possono emettere una stessa nota (un medesimo tono), suoni cioè che hanno la stessa armonica fondamentale.

È possibile tuttavia che le armoniche superiori abbiano intensità *relative* differenti: il timbro di uno strumento dipende infatti dall'importanza che assumono le armoniche superiori (→ 5).

Le onde sonore

1. Vibrazione dell'aria per la percussione di un gong: gli strati adiacenti si comprimono, si dilatano e si comprimono nuovamente.

2. Intervallo delle frequenze emesse da strumenti musicali e dalla voce umana (l'organo copre quasi tutte le frequenze percepite dall'uomo).

3. Il suono prodotto dal diapason: soltanto armoniche semplici.

Intensità relativa	Suono
1	soglia di udibilità
10^{1}	respiro normale
10^{2}	stormire delle foglie nella brezza
10^{4}	biblioteca
10^{5}	ristorante tranquillo
10^{6}	conversazione tra due persone
10^{7}	traffico intenso
10^{9}	cascate del Niagara
10^{10}	metropolitana
10^{12}	decollo di un aereo ad elica
10^{13}	fuoco di una mitragliatrice
10^{14}	decollo di un piccolo aereo a reazione
10^{17}	partenza di un missile

4. Intensità relative ad alcuni suoni riferite al valore limite di 10^{16} Watt/cm^2 (sotto il suono non è avvertibile).

5. Tromba e chitarra hanno le stesse note musicali ma timbro diverso: sono diverse le armoniche superiori.

La termologia

Temperatura e calore

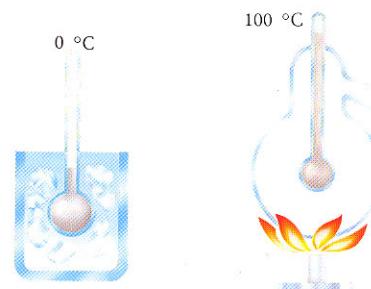
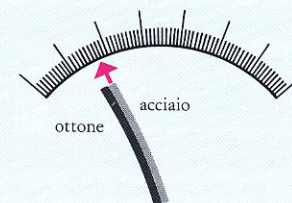
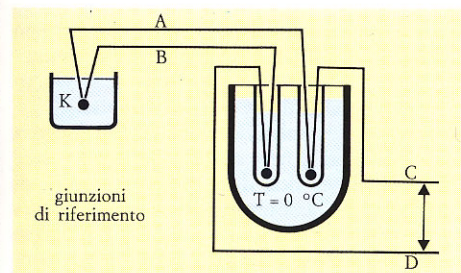
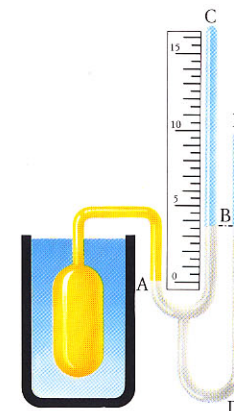
Poniamo a confronto un corpo che sia stato riscaldato e un cubetto di ghiaccio: diremo che il primo è più caldo (avvicinandoci avvertiamo infatti una sensazione di calore), mentre l'altro produce una sensazione di freddo. La grandezza fisica che misura queste sensazioni è la *temperatura*.
Per ottenere una misura quantitativa della temperatura si fa ricorso, come per la forza, agli effetti fisici che produce; essa può essere determinata infatti attraverso le variazioni di volume del corpo sottoposto a cambiamenti di temperatura.

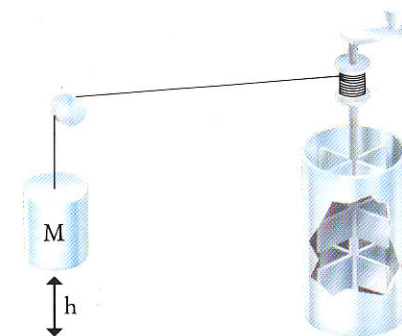
Scala termometrica

Per definire una scala di temperature e per costruire uno strumento che misuri la temperatura (*termometro*), si ricorre alla proprietà sperimentale, propria di quasi la totalità dei corpi, di dilatarsi quando sono sottoposti a riscaldamento, o di contrarsi, quando invece sono raffreddati.
Il termometro è costituito da un sottile tubo di vetro, chiuso a una estremità e terminante dall'altra con un piccolo bulbo contenente un liquido (acqua, alcool, mercurio, ecc.). Per graduare la scala della temperatura è necessario stabilire delle temperature di riferimento (→ 1).
Per la taratura della scala centigrada si procede come segue: posto il bulbo del termometro a contatto con il ghiaccio fondente alla pressione di 1 atmosfera, si lascia trascorrere il tempo sufficiente perché il termometro venga in equilibrio con il ghiaccio: a questo punto il livello raggiunto dalla colonna di mercurio si assume come 0 della scala. Si pone quindi il termometro in un recipiente con acqua bollente, sempre alla pressione di 1 atmosfera; si assume come grado 100 della scala il livello raggiunto dal liquido, quando si sia stabilita una situazione di equilibrio fra acqua e termometro.
La parte del tubo compresa fra questi due punti (0 e 100) viene divisa in 100 parti uguali, i cosiddetti *gradi centigradi*: se la colonna termometrica sale di una divisione, si dice che la temperatura è aumentata di un grado centigrado (1 °C).

Calore

Poniamo a contatto due corpi di diversa temperatura: quello che possiede una temperatura più elevata cede all'altro una certa quantità di energia, detta *energia termica* o, più semplicemente, *calore*.
Il calore è stato considerato per lungo tempo un fluido imponderabile contenuto nei corpi, in grado di passare dai più caldi ai più freddi, fino a che le rispettive temperature non risultino uguali.
Gli esperimenti del conte di Rumford, di Davy e di Joule cancellarono questa ipotesi. Joule, in particolare, misurò l'equivalente fra unità di calore (*caloria*) e unità di energia.
Il calore è dunque una forma di energia; come tale, esso può assumere con facilità una forma diversa senza per questo distruggersi né essere creato (principio della conservazione dell'energia).
A livello microscopico, il trasferimento di calore si può interpretare come un trasferimento di energia cinetica per collisione delle particelle che costituiscono i due corpi, oppure come trasferimento di energia radiante da un corpo all'altro. Non si parla pertanto di "calore contenuto" in un corpo, ma soltanto di calore *assorbito* o *ceduto*.
L'unità di misura termica è la *caloria*, corrispondente alla quantità di calore che occorre infondere in un grammo d'acqua per elevare la sua temperatura di 1 °C. L'energia corrispondente ad una caloria equivale a 4,18 joule, calcolabile per mezzo di un dispositivo, simile a quello utilizzato da Joule (→ 6).
A un peso di massa M è collegata una funicella, avvolta all'altra estremità intorno a un albero ruotante, cui sono connesse delle pale immerse in acqua. Se il peso viene fatto cadere per un'altezza h, la quantità di energia ΔQ assorbita dall'acqua per attrito con le pale è uguale al lavoro Mgh, fatto dal campo gravitazionale sul peso, *meno* l'energia cinetica con la quale il peso giunge a terra, *meno* ancora il lavoro compiuto per vincere gli attriti meccanici presenti nel dispositivo.
Misurando la variazione di temperatura dell'acqua, si ottiene l'energia equivalente ad una caloria.

La temperatura e il calore

1. Le temperature di riferimento della scala centigrada: a sinistra, il punto di fusione del ghiaccio (0 °C); a destra, il punto di ebollizione dell'acqua (100 °C).

2. Flessione di un ago per le diverse dilatazioni dei due metalli (la scala solidale, opportunamente tarata, dà la temperatura).

3. Termometro a termocoppia. A contatto del corpo di cui si vuole determinare la temperatura si pone una giunzione dei metalli A e B. Se la temperatura non corrisponde a quella di riferimento (0 °C), si genera una differenza di potenziale, ai due estremi C e D.

4. Termometro a gas a volume costante: mantenendo il livello del gas costante allo 0 (della scala), la differenza di pressione tra stato di riferimento e stato di equilibrio con il corpo in esame indica la temperatura di questo.

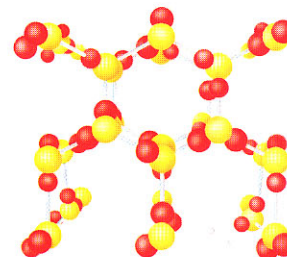
5. Occorrono 1000 calorie per aumentare di 1 °C la temperatura di 1 kg d'acqua.

6. Il "mulinello" usato da Joule per dimostrare l'equivalenza calore-lavoro.

Fusione ed evaporazione

I corpi solidi sono composti da particelle disposte nelle tre dimensioni secondo reticoli periodici (→ 1). Le particelle conservano sempre una separazione reciproca e possono vibrare attorno a determinate posizioni di equilibrio.
Quando si dà calore a un corpo, aumenta nello stesso tempo l'energia cinetica di vibrazione delle particelle componenti e, di conseguenza, cresce l'ampiezza delle oscillazioni.
Si dice che un corpo passa dallo stato solido allo stato liquido, quando gli viene fornita una quantità di calore tale che l'energia cinetica acquisita dalle singole particelle è sufficiente a rimuoverle indefinitamente dalle posizioni iniziali d'equilibrio.
Il fenomeno si produce per ogni corpo omogeneo a temperatura costante, detta *temperatura di fusione*; il passaggio dallo stato solido allo stato liquido si dice *fusione*. Durante la fusione, la temperatura resta costante, sebbene si fornisca calore al corpo. Questo calore si convertirà in lavoro contro le forze di coesione tendenti a mantenere unite le particelle.
La quantità di calore necessaria per fondere un grammo di una certa sostanza si dice *calore di fusione*. Ad esempio, la temperatura di fusione del ghiaccio è di 0 °C: se riscaldiamo il ghiaccio (che ha temperatura inferiore allo zero) fino a 0 °C, il ghiaccio non fonde se non gli diamo altro calore; se continuiamo invece a fornirgli calore, la temperatura si mantiene a 0 °C e sono necessarie 80 calorie per fondere un grammo di ghiaccio. Il calore di fusione del ghiaccio è quindi di 80 calorie per grammo (→ 2). Viceversa, se raffreddiamo l'acqua, togliendole calore, la temperatura discende fino a 0 °C e da questo valore si mantiene costante: il calore di congelamento è uguale a quello di fusione (→ 5).
I liquidi sono costituiti da particelle che, pure essendo soggette a forze di attrazione e coesione, si possono muovere in tutte le direzioni. In particolare, le particelle superficiali possono muoversi verso l'esterno del liquido. Se l'energia cinetica di queste particelle è debole, le forze di coesione sono in grado di trattenerle all'interno; se l'energia cinetica è invece elevata, le particelle possono uscire dal liquido, senza più subire le forze attrattive di altre particelle. È ovvio che il numero di particelle con energia sufficiente a lasciare il liquido è tanto maggiore quanto più elevata è la temperatura del liquido.
Se le particelle in grado di uscire dal liquido si vengono a trovare nell'ambiente a distanze notevoli, esse costituiscono quello che si dice un *vapore*. L'*evaporazione* è il fenomeno di passaggio tra la fase liquida e quella gassosa. Per fare evaporare un grammo di liquido è necessario intervenire con la quantità di calore caratteristica di quel liquido: il *calore di evaporazione* (→ 3).
Quando si condensa, torna cioè alla fase liquida, il vapore restituisce una quantità di calore identica a quella richiesta per l'evaporazione: il calore di condensazione è perciò uguale al calore di evaporazione. Nel caso dell'acqua, esso corrisponde a 537 calorie per grammo.
Tra i cambiamenti di stato è da ricordare la *sublimazione*, cioè il passaggio diretto dallo stato solido al gassoso e viceversa: questo fenomeno si osserva nello iodio a temperatura ambiente.

Influenza della pressione

La fusione e la solidificazione hanno luogo a temperature in genere diverse per ogni valore della pressione, cioè della forza per unità di superficie che l'ambiente esterno esercita sopra un corpo (solido, liquido o gassoso). Il ghiaccio fonde, ad esempio, a una temperatura inferiore a 0 °C, se sottoposto a una pressione superiore a quella atmosferica (per la rappresentazione del fenomeno → 4).
La pressione ha un ruolo di grande importanza anche nel fenomeno dell'evaporazione.
In un recipiente parzialmente ripieno di liquido, alcune particelle fuoriescono dal liquido e vanno ad occupare la porzione del recipiente rimasta libera. Sono particelle allo stato di vapore che si muovono in tutte le direzioni facendo anche ritorno nel liquido e determinando due flussi di particelle: uno che esce dal liquido e l'altro che vi entra.
Quando il numero delle particelle in uscita è maggiore, si ha *evaporazione* (p. 35 → 1a); abbiamo invece *condensazione*, quando è maggiore il numero delle particelle di ritorno (p. 35 → 1b).
Nel corso dell'evaporazione aumenta, all'esterno, il numero di particelle di vapore per unità di volume, e aumenta quindi la pressione, cioè la *tensione del vapore*. Cresce anche, nel frattempo, il numero delle particelle che fanno

I cambiamenti di stato

1. Struttura cristallina del ghiaccio: ogni atomo di ossigeno (sfere chiare) è legato a quattro atomi di idrogeno (sfere scure).

2. Sopra: alla temperatura di 0 °C e pressione di 1 atm il ghiaccio non fonde. Sotto: con 80 calorie, si ha fusione (la temperatura rimane a 0 °C).

3. L'evaporazione è il passaggio dalla fase liquida a quella gassosa in seguito ad assorbimento di calore (per l'evaporazione di un grammo d'acqua occorrono 537 calorie). Il corpo umano sfrutta lo stesso principio per diminuire la sua temperatura mediante la sudorazione.

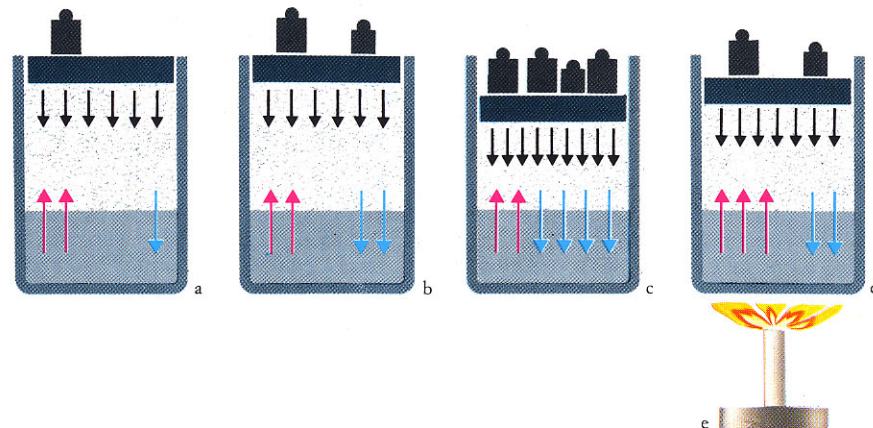
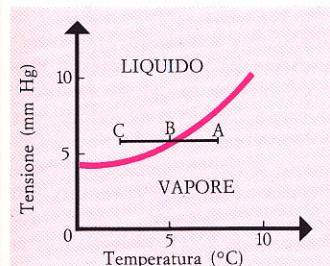
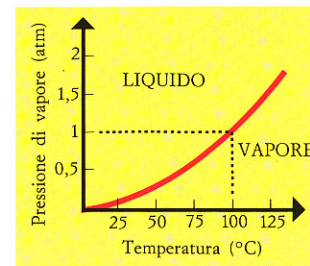
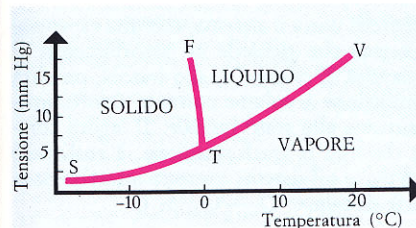
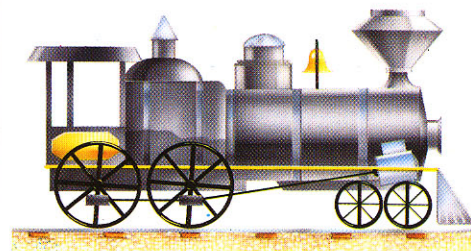
4. Il ghiaccio fonde se una corda in tensione esercita una pressione sulla sua superficie, e solidifica subito dopo.

5. Sopra: l'acqua comincia a congelare a 0 °C (pressione di 1 atm). Sotto: la temperatura rimane costante per tutto il processo di solidificazione.

ritorno al liquido nell'unità di tempo. Il liquido è in equilibrio con il suo vapore quando le particelle in entrata e in uscita sono in numero uguale (→ 1c). Si dice *vapore saturo* il vapore in equilibrio con il liquido e *tensione di vapore saturo* la tensione corrispondente.
Con l'aumento della temperatura, aumenta l'energia cinetica delle particelle e, quindi, il numero di queste in grado di uscire; in questo modo vien meno il precedente equilibrio e l'evaporazione continua finché, essendo aumentato il numero delle particelle di vapore, l'equilibrio si ristabilisce. Al rinnovato equilibrio corrisponde un nuovo valore della tensione di vapore saturo (→ 1d), legato alla temperatura.
Anche il vapore acqueo dell'atmosfera (→ 2a) giunge a saturazione (→ 2b) e in questo caso si condensa su qualsiasi superficie (a temperatura ambiente) e produce rugiada (→ 2c).
La tensione di vapore in funzione della temperatura (→ 3) mostra che i valori corrispondenti ai diversi stati di equilibrio fra liquido e vapore formano una curva, detta *curva di evaporazione*.
A una certa temperatura, se la tensione di vapore è inferiore al valore di saturazione, avviene che dopo qualche tempo sia presente solo vapore, mentre a tensioni di vapore superiori il vapore non esiste, perché le particelle gassose, trascorso un certo periodo, passano alla fase liquida. Si dice *curva di fusione* la rappresentazione grafica degli stati di equilibrio fra il corpo allo stato liquido e il corpo allo stato solido. La curva di evaporazione (→ 3) e la curva di fusione si intersecano in un punto T (→ 4) che dà lo stato di equilibrio presente sia sulla curva di evaporazione sia sulla curva di fusione. In questo punto le tre fasi vengono in equilibrio: il punto appartiene perciò anche alla curva di sublimazione e viene definito *punto triplo*.

Ebollizione

Con un adeguato aumento della temperatura, nel liquido ha luogo un nuovo fenomeno: l'*ebollizione*.
Il moto di tutto il liquido assume, con l'ebollizione, un aspetto turbolento, mentre dalla sua superficie si liberano rapidamente bolle di vapore.
La temperatura di ebollizione di un liquido omogeneo, per una data pressione esterna, è sempre costante (cresce con l'aumentare della pressione esterna e viceversa).
In alta montagna, ad esempio, dove la pressione atmosferica è inferiore a quella del livello del mare, la temperatura di ebollizione dell'acqua è inferiore a 100 °C.
Di contro, in condizioni di alta pressione (in una pentola a pressione o nella caldaia di locomotive a vapore) la temperatura di ebollizione dell'acqua è superiore a 100 °C (→ 5).
Perché sia possibile l'ebollizione, è necessario che nel liquido siano disperse piccole particelle di altre sostanze (bolle d'aria, sali, ecc.).
Le bolle d'aria, disperse in un liquido come l'acqua, sono sottoposte a una pressione superiore a quella atmosferica (ciò fa sì che le bolle d'aria si presentino in dimensioni molto ridotte e siano pressoché invisibili all'occhio).
Con l'aumento della temperatura, aumenta l'energia cinetica delle singole particelle di aria e di vapore acqueo che compongono le bolle; di conseguenza, cresce anche la pressione interna e il volume.
Se il liquido riceve via via nuovo calore, le bolle interne tendono ad aumentare di volume: a un certo punto, diventate finalmente visibili, salgono in superficie e liberano aria e vapore acqueo.

I cambiamenti di stato

1. Influenza della pressione e del calore sulla vaporizzazione. Da sinistra: *a.* evaporazione del liquido; *b.* aumento della pressione e condensazione del vapore; *c.* liquido in equilibrio con il vapore (tante molecole in uscita, altrettante in entrata); *d.* aumento della temperatura: le molecole acquistano energia cinetica ed evaporano in numero maggiore.

2. Grafico del cambiamento di stato del vapor d'acqua condensato sopra una pianta durante il raffreddamento notturno.

3. La curva di evaporazione dell'acqua.

4. Diagramma di stato per l'acqua. S, F, V sono, rispettivamente, le curve di sublimazione, fusione e evaporazione. I tre stati coesistono nel punto T (detto "punto triplo").

5. La caldaia della locomotiva: a 17 atm, l'acqua bolle a 205 °C.

La termodinamica

Il calore, come abbiamo veduto, è una forma di energia che si può trasformare in lavoro e viceversa. La parte della fisica che si occupa delle relazioni tra calore e lavoro è la "termodinamica". Vediamo, anche per questa, i princìpi fondamentali.

Il "primo principio" della termodinamica è, in pratica, un'estensione del principio di conservazione dell'energia: *L'energia non si crea e non si distrugge ma può passare da una forma a un'altra.*

La variazione di energia che ha luogo in un sistema, durante una trasformazione qualsiasi, è, in altre parole, uguale alla quantità di energia che il sistema riceve dall'ambiente che lo circonda. Questo spiega perché, in presenza di un fenomeno di attrito, non si conserva energia meccanica: una parte si trasforma in calore e si conserva l'energia totale.

Se mettiamo in azione un freno, producendo attrito, sopra una ruota in movimento, diminuisce l'energia cinetica della ruota, ma, secondo il teorema delle forze vive, si ha un lavoro delle forze di attrito necessariamente uguale alla quantità di calore assorbita dalla ruota. *Non è possibile costruire una macchina termica a funzionamento periodico che produca lavoro, senza assorbire una quantità equivalente di calore.*

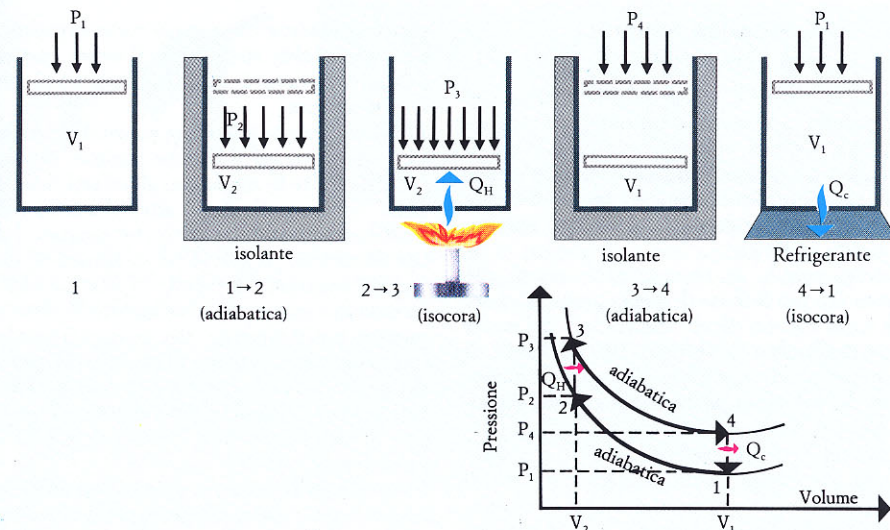
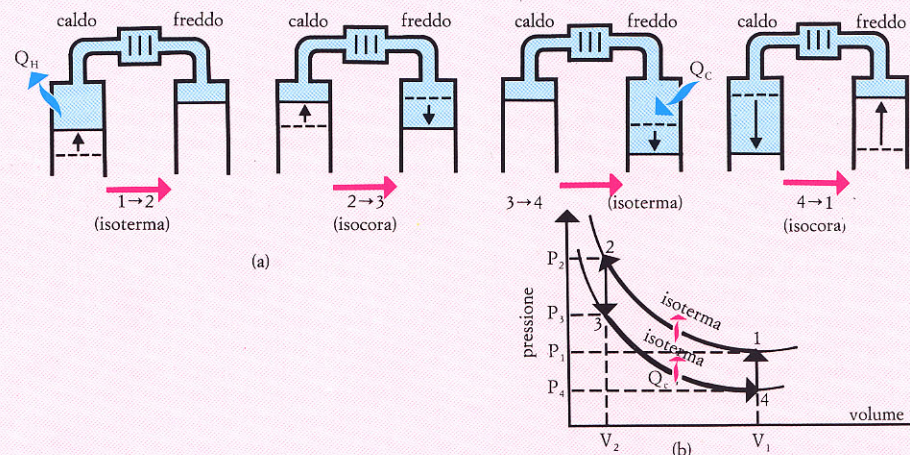
Esaminiamo il ciclo di un normale motore a benzina (ciclo otto, → 1): all'inizio a pressione P_1 e volume V_1 (stato 1), il sistema viene portato successivamente a pressione P_2 e volume V_2 (stato 2) a mezzo di una compressione adiabatica, cioè senza scambio di calore con l'esterno. Si aumenta quindi la pressione, con una trasformazione a volume costante V_2, fino a portare il sistema allo stato 3; a questo punto una decompressione adiabatica porta il sistema allo stato 4 e, infine, con una decompressione a volume costante V_1, il sistema ritorna alla posizione iniziale 1. Il risultato è un lavoro "netto" compiuto dalla macchina termica assorbendo una quantità di calore: $Q_H - Q_C > 0$.

Il "primo principio" stabilisce la conservazione dell'energia sotto qualsiasi forma, ma non vieta che una parte di calore venga trasformata in lavoro. In base a questo principio sarebbe dunque possibile, in teoria, far girare la ruota di una bicicletta con un raffreddamento: una trasformazione evidentemente inattuabile.

Il "secondo principio" della termodinamica permette di stabilire invece le trasformazioni effettivamente realizzabili. Esso può essere enunciato così: *Non è possibile costruire una macchina termica operante in ciclo che si limiti a produrre lavoro assorbendo calore da una sola sorgente.* Se non valesse questo principio, si potrebbero, ad esempio, costruire navi capaci di utilizzare soltanto l'energia ricavata dal mare. Un altro modo di enunciare il principio suona così: *il calore passa sempre, spontaneamente, dai corpi caldi ai corpi freddi.*

Ciò non significa d'altra parte che il calore non possa passare da un corpo freddo a un corpo caldo (come nelle macchine refrigeranti), ma solo che questo tipo di passaggio non è spontaneo, ma richiede, per avere effetto, del lavoro. Nell'esempio della ruota frenata che, per assurdo, si suppone di mettere in movimento mediante un raffreddamento, bisognerebbe tener presente che il corpo freddo cede calore, per trasformarlo in lavoro contro le forze del freno: contrariamente a questo principio si dovrebbe trasferire calore dalla ruota sempre più fredda al freno sempre più caldo.

In → 2 è rappresentato, in forma idealizzata, il ciclo di Stirling di un refrigeratore. Il sistema, inizialmente allo stato 1, è portato allo stato 2 per mezzo di una compressione a temperatura costante (isoterma), durante la quale si ha una cessione di calore. Allo stato 3 si perviene con una trasformazione a volume costante; successivamente si porta il sistema, con una espansione isoterma che richiede un assorbimento di una quantità di calore Q_c, allo stato 4; un'altra trasformazione a volume costante riporta infine il sistema allo stato iniziale. Il lavoro compiuto, durante la trasformazione, è realizzato in gran parte sul sistema e questo infatti cede la quantità di calore: $Q_C - Q_H > 0$.

Trasformazioni cicliche

1. Rappresentazione schematica (in alto) e grafica (sotto) del ciclo di funzionamento di un ordinario motore a benzina (ciclo otto). Esso risulta composto da due trasformazioni adiabatiche (1 → 2 e 3 → 4) e da due trasformazioni a volume costante (isocore) (2 → 3 e 4 → 1).

2. Rappresentazione schematica (sopra) e grafica (sotto) delle fasi di funzionamento di un refrigeratore (ciclo di Stirling): due trasformazioni isoterme (1→2 e 3→4) e due trasformazioni isocore (2→3 e 4→1).

L'elettricità

La carica elettrica e il campo elettrico

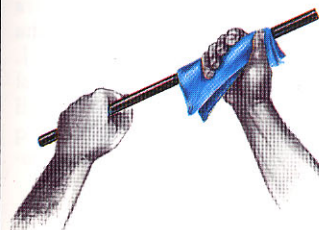
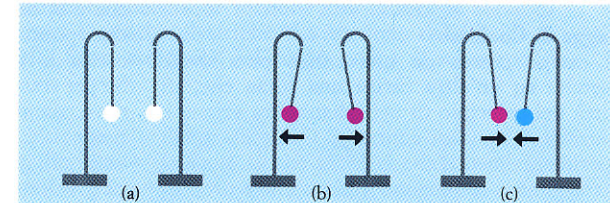
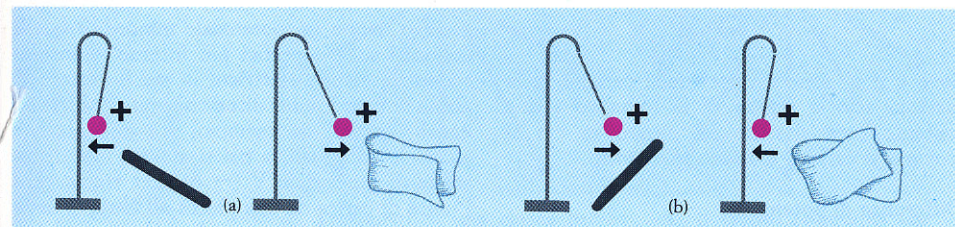
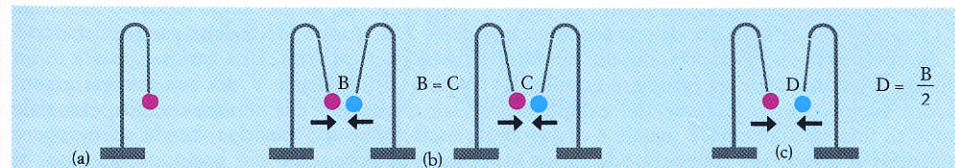
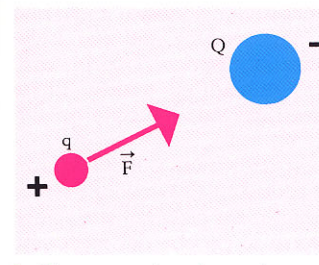
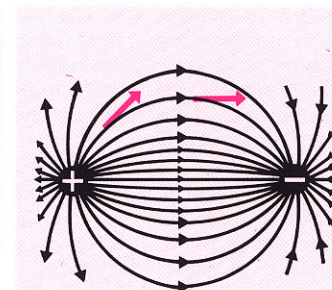
Intorno al 500 a.C. Talete di Mileto rilevò che un frammento d'ambra strofinato con un panno attira corpi di piccole dimensioni e che il fatto non può considerarsi gravitazionale (per usare un'espressione attuale), perché l'ambra non sottoposta a tale trattamento non manifesta questa capacità.
Esistono perciò, in natura, delle azioni che sono molto più intense di quelle gravitazionali. Tali forze furono dette "elettriche" dal nome greco dell'ambra (*élektron*). Effetti simili si osservano peraltro, sempre dietro strofinamento, anche nel vetro, nella ceralacca, nell'ebanite, ecc. (→ 1).
Si chiama "pendolo elettrico" un particolare sistema che risulta composto da una pallina di midollo di sambuco appesa, con un filo di seta, a un apposito braccio. In → 2b abbiamo due pendoli posti l'uno accanto all'altro. Toccati con bacchette di vetro opportunamente strofinate, i due pendoli si respingono con una certa violenza. Se una delle due bacchette fosse di ceralacca anziché di vetro, i due pendoli mostrerebbero invece una forte attrazione reciproca (→ 2c).
Sostituiamo quindi, in momenti successivi, uno dei due pendoli con pendoli toccati con materiali diversi. Vedremo che alcuni si comportano come il vetro e altri come la ceralacca. Questo diverso comportamento indica la presenza di due tipi di elettricità; quella del vetro è "positiva", quella della ceralacca "negativa". In conclusione potremo dire che *le elettricità di segno uguale si respingono e quelle di segno diverso si attraggono*.

Carica elettrica

La qualità fisica che sta all'origine delle forze elettriche è detta "carica elettrica"; i corpi che si attraggono si dicono "caricati" positivamente o negativamente, secondo il tipo di elettricità di cui dispongono.
Una bacchetta di vetro, sottoposta a strofinamento e avvicinata a un pendolo con carica positiva lo respinge. Se avviciniamo al pendolo lo stesso panno con il quale si è già strofinato il vetro, si osserva che questo viene attratto: da ciò si rileva che, strofinando il vetro, questo si carica positivamente, mentre il panno si carica negativamente.
Abbiamo perciò una prima prova della presenza, nella materia, di cariche positive o negative, distribuite in modo che gli effetti delle une siano compensati dagli altri: l'azione dello strofinamento non ha fatto che separare i due tipi di cariche. Il panno ha strappato al vetro cariche negative (elettroni), rivelando così un eccesso di cariche negative mentre il vetro si è caricato positivamente. Per quanto riguarda la ceralacca, questa, invece di perdere elettroni, li riceve dal panno, rimasto —in questo caso — caricato positivamente, fino al punto di respingere il pendolo caricato con l'elettricità del vetro (→ 3).
Un pendolo con carica elettrica è utilizzato, come campione, per misurare le cariche elettriche (→ 4). Se la forza esercitata da questo campione su un pendolo elettrico B è uguale a quella esercitata su C, ciò significa che B e C hanno la stessa carica. Se la forza esercitata su D è la metà di quella esercitata su B, B ha una carica doppia rispetto a D. Possiamo dire dunque che se la forza presente in un pendolo A risulta n volte maggiore di quella presente in B, la carica di A è n volte maggiore di quella di B.

Campo elettrico

Se in una regione dello spazio è presente una carica elettrica Q, questa esercita una forza sulle cariche poste in qualsiasi punto di quella regione. Se in un punto collochiamo una carica di prova positiva q, tanto piccola da non alterare il campo di forza creato da Q (→ 5), il rapporto fra la forza esercitata in quel punto sulla carica positiva e la stessa (purché molto piccola) prende il nome di *campo elettrico*: un vettore che si indica con **E**. La forza esercitata in quel punto sulla carica q è $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$.
In ogni punto dello spazio esiste un vettore campo elettrico ed è possibile tracciare linee che in ogni punto siano tangenti al vettore campo in quel punto: queste si dicono *linee di forza* del campo elettrico (→ 6).

La carica elettrica e il campo elettrico

1. Sfregata con un panno, la bacchetta di vetro attira verso di sé pezzetti di carta.

2. Da sinistra: due palline non elettrizzate non si attraggono e non si respingono; due palline dello stesso segno si respingono; due palline di segno diverso si attraggono.

3. Interazioni tra cariche elettriche. Da sinistra: la bacchetta di vetro strofinata con un panno prende carica positiva e respinge la pallina di carica positiva (il panno assume invece carica negativa). Con la bacchetta di ceralacca la situazione risulta inversa.

4. Misura di cariche elettriche. Preso un pendolo elettrizzato come campione e avvicinato successivamente a due pendoli diversi, si dice che questi hanno la stessa carica se esercitano sul primo la stessa forza.

5. Il campo elettrico nel punto occupato dalla carica q è il vettore: $\mathbf{E} = \mathbf{F}/q$.

6. Le linee di forza di un campo elettrico generato da due cariche: una positiva, l'altra negativa. Le linee sono tangenti in ogni punto al vettore campo elettrico (qui in rosso). Per convenzione il verso è quello che va dalla carica positiva alla negativa.

Il potenziale elettrico

Legge di Coulomb
Il campo creato da una carica puntiforme esercita su un'altra carica una forza che, in virtù del principio di uguaglianza fra azione e reazione, è uguale e contraria. Coulomb stabilì sperimentalmente che la forza con la quale si attraggono o respingono due cariche è proporzionale a queste e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che le separa (→ 1). Questa legge si può riassumere in una formula (*formula di Coulomb*):

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{qq'}{d^2}$$

dove q e q' sono i valori delle cariche, d la distanza che le separa, F la forza ed ε una costante caratteristica del mezzo in cui si trovano le cariche (*costante dielettrica*).

Differenza di potenziale
Le forze elettriche hanno una caratteristica importante: sono *conservative*. Quando muoviamo una carica in un campo elettrico, in ogni punto questa è sottoposta alla corrispondente forza elettrostatica; per spostarla sarà perciò necessario compiere un lavoro contro le forze del campo. Se la carica parte da una posizione e a questa fa ritorno percorrendo un circuito chiuso, il lavoro totale da compiere è nullo. Il lavoro svolto contro le forze del campo nel corso di uno spostamento è uguale e di segno contrario al lavoro per trasportare la carica in senso opposto (→2): in un caso, il campo si oppone allo spostamento, nell'altro lo favorisce. Nel primo caso si ha un lavoro positivo contro le forze del campo, nel secondo invece è il campo che effettua il lavoro e si ha dunque un lavoro negativo. *Il lavoro da compiere per trasportare una carica elettrica da un punto a un altro di un campo elettrico non dipende dal percorso* (→3). La forza dipende piuttosto dalla grandezza q della carica; infatti **F** = q**E**. Il lavoro dipende inoltre dalla posizione dei punti di partenza e d'arrivo. Se la carica è uguale all'unità, il lavoro da fare contro le forze del campo, per portarla da un punto A a un punto B, dipende soltanto dalla posizione di questi punti: tale lavoro prende il nome di *differenza di potenziale tra* A *e* B (→ 4).

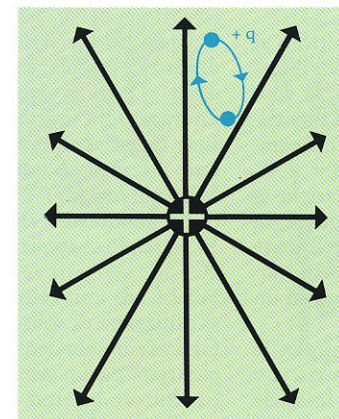
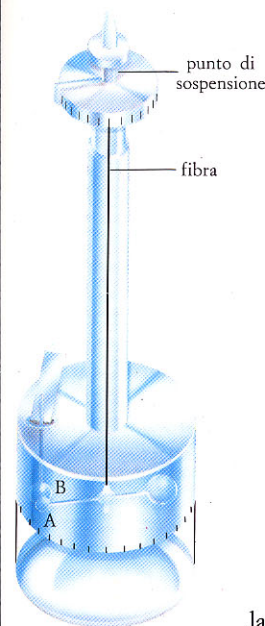
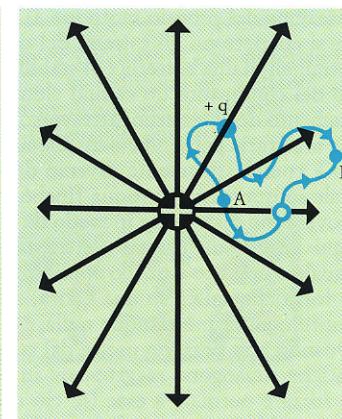
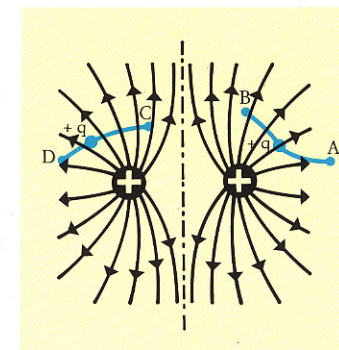
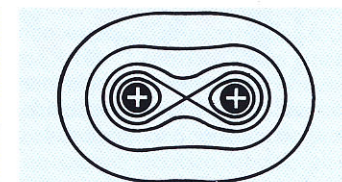
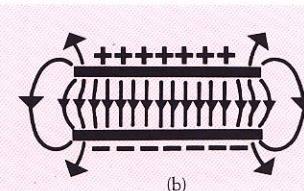
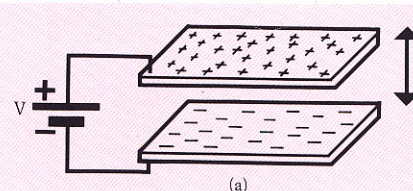
Nel sistema MKS l'unità di potenziale è il *volt*, che è la differenza di potenziale esistente fra due punti che richiedono, per portare una carica di 1C dall'uno all'altro, un lavoro di 1J. Se per trasportare da A e B una carica di 1C si deve compiere un lavoro pari alla differenza di potenziale $V_B - V_A$, per portare una carica q volte più grande, bisognerà realizzare un lavoro q volte maggiore, ossia:

$$L_{AB} = q\,(V_B - V_A)$$

dove L_{AB} è il lavoro da fare. In → 5 si danno le superfici equipotenziali riferite a due cariche positive identiche. I punti sulle superfici più esterne hanno un potenziale minore di quelli collocati sulle superfici più interne. Consideriamo un campo elettrico, in cui il vettore **E** abbia in tutti i punti direzione, verso e modulo eguali, quello, ad esempio, fra due placche parallele ed uguali, a cui si applica una differenza di potenziale V (→ 6). Per trasportare l'unità di carica da una placca all'altra, si deve fare perciò un lavoro uguale a V. Ma la forza esercitata su di essa è pari ad **E**; se immaginiamo l'unità di carica in movimento lungo una linea di forza, il lavoro sarà uguale a V = Ed, dove d rappresenta la distanza che separa le placche. Così, in un campo elettrico uniforme E = V/d, l'unità MKS di un campo elettrico è il volt/metro (V/m). Una carica q, posta in un punto di potenziale V, ha una energia potenziale qV e tende alla minima energia potenziale possibile; se q è positiva, tende ad occupare punti di potenziale più basso; se negativa, si comporta in modo contrario.

Conduttori e isolanti
Quando la carica positiva di un corpo è uguale alla carica negativa, il corpo è in uno stato neutro e non produce, nel suo insieme nessun fenomeno elettrico. I corpi, contenenti un certo numero di cariche libere di muoversi al loro interno, si dicono *conduttori*.
Si ha corrente elettrica quando al moto disordinato delle cariche (dovuto all'agitazione termica) si sostituisce un moto ordinato che spinge in uno stesso verso le cariche del medesimo segno.
Le sostanze, prive di cariche mobili, e dove non può passare corrente, sono dette *isolanti*.

Il potenziale elettrico

1. A sinistra: la bilancia di torsione che misura le forze di interazione fra cariche elettriche. La torsione del filo dà la misura della forza esercitata dal corpo carico A sul corpo B.

2. Trasporto di una carica in versi opposti: nei due casi il lavoro è uguale e di segno opposto.

3. Il lavoro compiuto per trasportare la carica q da A a B non è legato al percorso.

4. Una carica positiva si sposta spontaneamente dai punti a potenziale maggiore a quelli a potenziale minore, cioè da C a D (lavoro delle forze del campo positivo). Nel caso inverso (da A a B) il lavoro è negativo.

5. Superfici equipotenziali del campo generato da due cariche uguali (tutte perpendicolari alle linee di forza, → 4).

6. Due placche parallele collegate a una differenza di potenziale V: il campo elettrico prodotto ha, in tutti i suoi punti, direzione, verso e modulo uguali. Le linee di forza sono dunque parallele fra loro e perpendicolari alle due lastre (se si trascura l'effetto che si produce ai bordi).

L'induzione elettrostatica

Nei conduttori una parte degli elettroni è libera di muoversi (*elettroni di conduzione*). Quando non esiste campo elettrico, essi si muovono disordinatamente, spesso urtando contro gli atomi fermi e cambiando così la direzione del proprio moto (→ 1).
Se si connettono gli estremi del conduttore ai terminali di una batteria e si stabilisce all'interno del conduttore un campo elettrico, lo spostamento degli elettroni attraverso una superficie arbitraria perpendicolare alle linee del campo è complessivamente diverso da 0 (→ 2,4). Tale spostamento continua finché le cariche si troveranno distribuite in modo da originare, in ogni punto, un campo elettrico esattamente uguale e opposto a quello applicato all'esterno: la forza che agisce su una carica, situata in un punto qualsiasi, è dunque nulla.
Quando non possono uscire dal conduttore, le cariche rimangono raggruppate in superficie e la forza è normale a esse (se ciò non fosse, le sposterebbe sulla superficie).
Da questo fenomeno, detto *induzione* o *influenza elettrostatica* (→ 3), si deduce: 1. il campo elettrico interno a un conduttore in equilibrio è nullo; 2. è normale alla superficie del conduttore; 3. all'interno dello stesso non può esserci alcuna carica elettrica (→ 5). Questo significa che, ove un conduttore abbia una carica totale non nulla, essa è tutta distribuita in superficie (se il conduttore è in equilbrio).

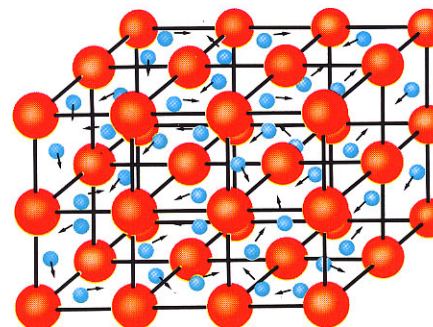
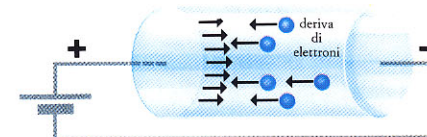
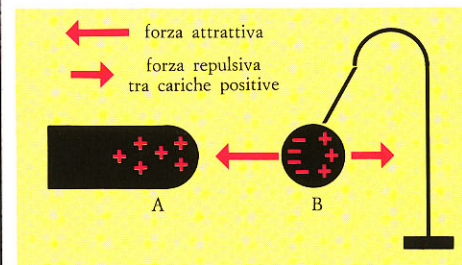
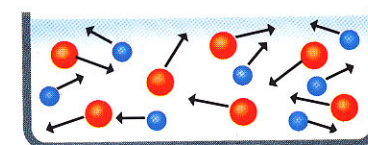
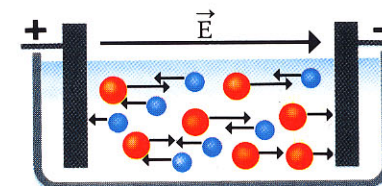
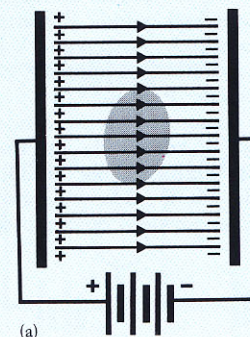
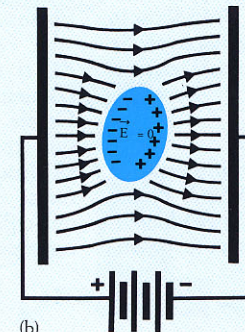
Condensatori. Energia di un campo elettrico
Due conduttori, posti l'uno vicino all'altro e caricati con cariche uguali ed opposte, tali che ogni linea di forza in partenza dal conduttore positivo termina nel conduttore negativo, costituiscono un sistema che si dice *condensatore* I conduttori che esercitano un'*induzione completa* vengono definiti *armature* del condensatore.
Per portare una unità di carica positiva dall'armatura negativa a quella positiva, è necessario, come si sa, compiere un lavoro contro le forze del campo; esiste dunque una differenza di potenziale fra l'una e l'altra armatura. Se si raddoppia la carica delle armature, si raddoppia il lavoro; se la si triplica, si triplica anche il lavoro, e così via: quindi, il quoziente fra la carica delle armature e la differenza di potenziale in atto fra di loro si mantiene comunque costante.
Questo quoziente costante (a cui si dà il nome di *capacità* del condensatore) corrisponde a $C = Q/V$, dove C è la capacità, Q la carica e V la differenza di potenziale fra le armature. Quando due armature sono parallele e la loro distanza è piccola, è dimostrato che $C = \varepsilon S/d$, dove ε è la costante dielettrica del mezzo interposto fra le armature, S l'area della superficie di un'armatura di fronte all'altra e d la loro distanza. L'unità di misura nel sistema MKS è il *farad* (F), corrispondente alla capacità di un conduttore che assume il potenziale di 1V, quando si applica alle armature la carica di 1C.
Poiché tale unità è troppo grande, nella pratica si utilizzano di solito i suoi sottomultipli.
Caricare un condensatore significa trasportare elettroni da un'armatura all'altra tramite un conduttore esterno che le unisce. Lungo tale conduttore deve esistere un dispositivo in grado di compiere il lavoro necessario per trasportare gli elettroni all'armatura negativa, vincendo la forza di opposizione che essa esercita su questi.
Il lavoro si converte in energia elettrostatica immagazzinata nello spazio esistente fra le armature: è qui che si forma il campo elettrico. Quando il condensatore si scarica, si ha un recupero di energia che è uguale a:

$$L = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

dove Q è la carica del condensatore, V la differenza di potenziale fra le due armature e C la sua capacità. Nel caso del condensatore piano, il volume fra le armature è Sd, la differenza di potenziale V = Ed. Perciò:

$$L = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon S}{d} (E \cdot d)^2 = \frac{\varepsilon E^2 Sd}{2}$$

Dividendo questo per il volume Sd occupato dal campo, si ha l'energia per unità di volume: $\varepsilon E^2/2$. Il risultato è generale; si può dire perciò che in ogni campo elettrico l'energia si distribuisce in modo che in ogni punto la densità di energia risulti uguale a $\varepsilon E^2/2$.

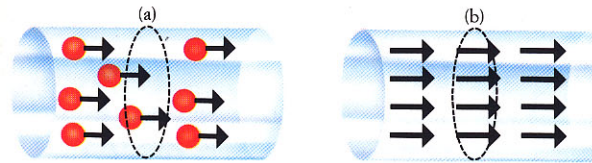
L'induzione elettrostatica

1. La struttura di un metallo: in rosso gli ioni positivi fissi; in blu, gli elettroni liberi.

2. Applicando al conduttore una differenza di potenziale, si inducono gli elettroni liberi a muoversi verso il punto a potenziale più alto.

3. Conduzione elettrostatica: nel conduttore neutro B, avvicinato a un corpo carico A, avviene una ridistribuzione di cariche per effetto delle cariche di B.

4. In una soluzione elettrolitica (in alto), il moto degli ioni è del tutto casuale. Se però si applica un campo elettrico (sotto), gli ioni positivi (in rosso) si dirigono verso il punto a potenziale più basso, mentre i negativi (in blu) vanno verso il punto a potenziale più alto.

5. Collochiamo un isolante fra le lamine di un condensatore (a sinistra): poiché le cariche sono fisse, si ha all'interno un campo elettrico. Se il corpo è invece un conduttore (a lato), le cariche mobili si portano in superficie e il campo all'interno è nullo.

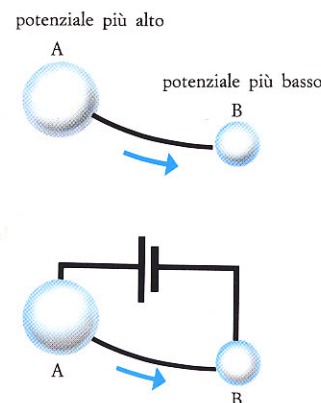
Corrente e potenza

Come si è visto, si ha *corrente elettrica*, quando le cariche mobili di un conduttore presentano un movimento globale.
Viene detta *intensità* di corrente la grandezza corrispondente alla carica elettrica che attraversa, nell'unità di tempo e in un verso determinato, la sezione di un conduttore.
Se indichiamo con i l'intensità, con q la carica che attraversa la sezione in un tempo t, abbiamo: $i = q/t$. Quando le cariche sono di segno diverso, alla circolazione di una carica positiva in un senso corrisponde la circolazione in senso contrario di una carica negativa. L'unità di intensità di corrente è l'*ampere* (A), cioè l'intensità di corrente che si ha con il passaggio di una carica di 1 C in un secondo. I comuni impianti elettrici sono, in genere, in grado di portare correnti di 15-20 ampere.
Se si uniscono due conduttori isolati, A e B (con B a un potenziale più basso di A), per mezzo di un filo conduttore, si avrà passaggio di corrente elettrica da A a B, finché i potenziali dei due conduttori si eguagliano per la perdita di carica di A e l'aumento di carica di B (→ 2).
Per mantenere in permanenza la corrente fra A e B, è necessario un dispositivo, il *generatore*, che riporta le cariche in A, dopo il passaggio da A a B. In questo modo, A e B si mantengono sempre nelle stesse condizioni, cioè la differenza di potenziale fra A e B è sempre costante (→ 3). Ciò significa prendere una carica q, con un'energia potenziale qV_B, e portarla in A, dove l'energia potenziale qV_A è più alta: a questo fine il generatore fornisce alla carica un'energia presa all'esterno del sistema considerato. Giunta in A, la carica q torna a passare in B spontaneamente, in quanto B ha potenziale più basso di A, per poi essere ricondotta in A: il lavoro necessario è dato dal generatore. Se si vuole una corrente permanente i circuiti devono dunque rimanere chiusi.

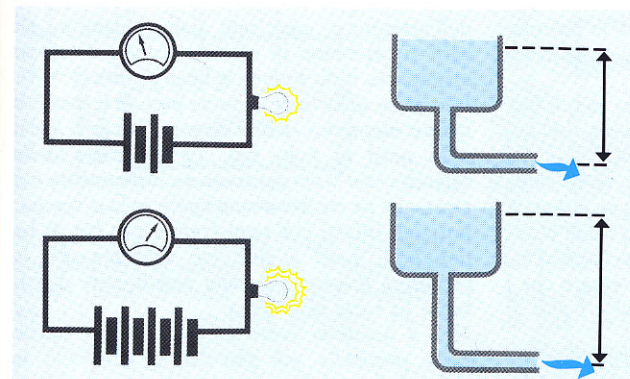
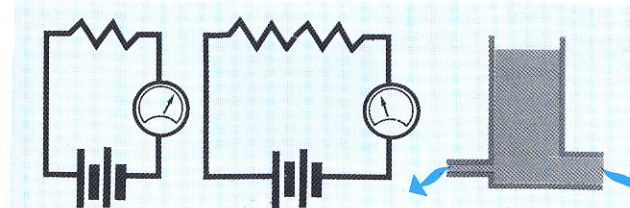
Legge di Ohm
Se fra A e B manteniamo una differenza di potenziale V, attraverso il filo che li unisce passa una corrente d'intensità i; se raddoppiamo, triplichiamo, ecc., la differenza di potenziale, anche l'intensità risulta raddoppiata, triplicata, ecc.: il quoziente V/i rimane cioè costante. Tale quoziente è una quantità caratteristica del filo conduttore: se infatti cambiamo il filo di unione fra A e B e ripetiamo l'esperimento, si arriva a un valore del quoziente costante ma diverso. Siffatta caratteristica del filo conduttore è la *resistenza* (R): $R = V/i$. Con questa formula è espressa la legge di Ohm: *la corrente i, che scorre in un filo, è proporzionale alla differenza di potenziale fra i suoi estremi e inversamente proporzionale alla sua resistenza* (→ 4, 5).
L'unità di misura nel sistema MKS è l'*ohm* (Ω) pari alla resistenza di un conduttore che lascia passare una corrente di 1 A, quando ai suoi estremi sia applicata una differenza del potenziale di 1 V.
La resistenza di un filo dipende, come si comprende, dalla sua lunghezza L e dalla sua sezione S; e, ovviamente, anche dal materiale adoperato. Abbiamo pertanto $R = \rho L/S$, dove il fattore ρ è la resistività del materiale.

Potenza (Legge di Joule)
Se una carica si muove liberamente da un morsetto all'altro di un cilindro a vuoto, il lavoro compiuto su di essa ne fa aumentare solo l'energia cinetica. Se invece una carica si muove attraverso un filo metallico, essa trasferisce energia al metallo, a seguito degli urti con i singoli atomi: una parte almeno del lavoro si trasforma perciò in calore.
La differenza di potenziale elettrico è data dal rapporto tra la quantità di lavoro compiuto e la carica: $L = qV$. Il prodotto dell'intensità di corrente per la differenza di potenziale è uguale al rapporto tra il lavoro e il tempo impiegato a compierlo: $L = Vi$; la potenza assorbita, e trasformata in calore, sarà quindi: P (watt) = V (volt) × i (ampere). Sostituendo V con Ri, si esprime la potenza in funzione della resistenza del materiale: $P = Ri^2$.
Grazie anche alle numerose ricerche condotte sulle trasformazioni di energia da una forma all'altra, Joule poté verificare per primo, in forma sperimentale, che il calore prodotto da una corrente è proporzionale al quadrato della corrente stessa.

Corrente e potenza

1. La carica che attraversa in un secondo la sezione di un conduttore è l'intensità di corrente elettrica (a sinistra). La quantità d'acqua che attraversa in un secondo la sezione di un tubo è la portata della corrente d'acqua (a lato).

potenziale più alto
A
potenziale più basso
B

2. Posizioni di equilibrio nella corrente elettrica e nella corrente liquida. La corrente va da A a B, finché questi non siano allo stesso potenziale. L'acqua passa da A a B, finché l'acqua dei tubi non sia allo stesso livello.

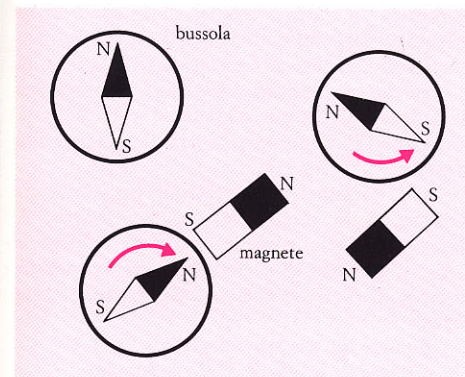
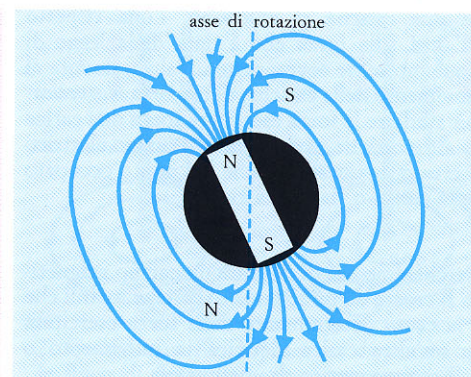
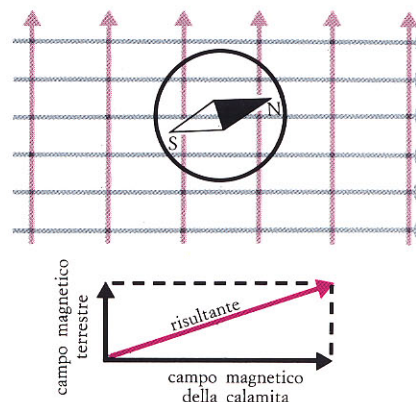
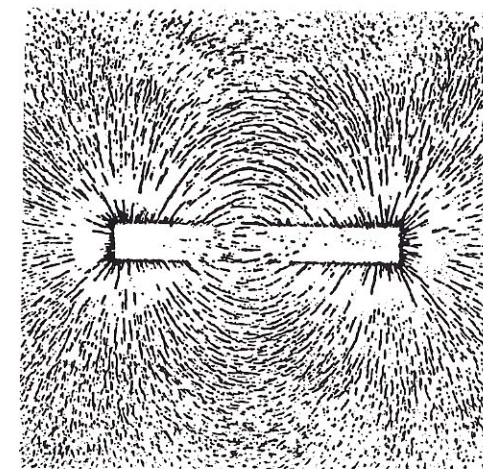
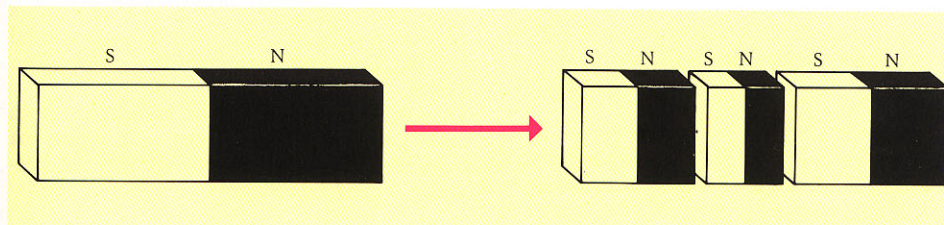
A
B

3. Analogia tra un generatore e una pompa: come il generatore mantiene costante la differenza di potenziale, così la pompa mantiene costante il livello dell'acqua.

4. Analogia tra differenza di potenziale e dislivello di altezza: se aumenta la differenza di potenziale, aumenta l'intensità di corrente (a sinistra); se aumenta il dislivello, aumenta la portata (a lato).

5. Resistenza elettrica e resistenza di un tubo: la corrente di un filo si riduce della metà, se si raddoppia la resistenza (a sinistra); il tubo più largo dà meno resistenza e maggiore portata (a lato).

Il magnetismo

Le calamite naturali

Fino dall'antichità è noto che alcune pietre (*magneti* o *calamite naturali*) si attraggono a vicenda e che l'attrazione si esercita anche su piccoli pezzi di ferro, di cobalto, di nichel e di altre leghe.
La proprietà di queste pietre di provocare attrazione (*magnetismo*) non può essere eliminata, come accade nel caso dell'elettricità generata per strofinamento: il magnetismo è una proprietà permanente del materiale. Un pezzo di acciaio temperato in presenza di un magnete acquista proprietà magnetiche, diventa cioè calamita, con la particolarità di non perdere questa qualità anche quando lo si separi dal magnete: è diventato una *calamita permanente*.
La bussola non è altro che un ago calamitato, che può girare liberamente intorno al suo centro; come fu scoperto in passato, un ago calamitato, quando non è in presenza di altre sostanze con proprietà magnetiche, assume rispetto alla Terra una posizione definita, orientandosi in direzione nord-sud. L'estremità dell'ago magnetico di una bussola che si orienta verso nord è chiamata polo nord del magnete e, analogamente, è chiamata polo sud del magnete l'altra estremità rivolta a sud. Una sbarra calamitata si comporta come la bussola: possiamo dire pertanto che ogni calamita ha un polo nord e un polo sud.
Il polo sud di una calamita e il polo sud di una bussola si respingono con violenza, se avvicinati l'uno all'altro; il polo nord della calamita e il polo sud della bussola, posti nella stessa condizione, si attraggono con identica violenza (i poli della calamita sono i due punti dove più intense si manifestano le forze d'attrazione). In sintesi, possiamo affermare che *i poli dello stesso nome si respingono e i poli di nome diverso si attraggono* (→ 1).
Il polo nord di un ago magnetico orientato verso nord è attratto in realtà dal polo sud della Terra, situato in prossimità del polo nord geografico (→ 2). Che l'ago della bussola assuma la direzione nord-sud in ogni punto prossimo alla Terra testimonia l'esistenza di un campo magnetico dovuto al magnetismo della Terra, proprio come esiste un campo gravitazionale terrestre dovuto alla massa della Terra.
In genere, in ogni punto dello spazio, in cui l'ago della bussola sia sottoposto ad attrazioni (positive o negative), siamo in presenza di un campo magnetico; quando la bussola non subisce alterazioni, ovvero è orientata in direzione nord-sud, si trovanel campo magnetico terrestre.
Se si avvicina alla bussola una calamita, la bussola devia dalla posizione dovuta al campo magnetico terrestre, perché il campo a cui ora è sottoposta è costituito dalla risultante dei campi magnetici della Terra e della calamita (→ 3).
La bussola fornisce così un campione su cui è possibile stabilire le direzioni di base degli effetti magnetici. Per esplorare un campo magnetico basterà spostare una bussola in diversi punti di esso, in modo da conoscere la direzione del campo e poterne tracciare le linee di forza.
La limatura di ferro, spolverizzata su un cartoncino collocato sopra una calamita, si converte in tanti piccoli aghi calamitati, per effetto dell'attrazione esercitata dalla calamita: gli aghi si orientano in effetti secondo il campo magnetico, indicandone le linee di forza (→ 4).
L'insieme delle linee di forza prende il nome di *spettro magnetico* della calamita. Il verso è dal polo nord al polo sud. Le proprietà della calamita non si concentrano esclusivamente nei punti che ne costituiscono i poli; se la si spezza, notiamo infatti che ogni frammento (→ 5) ha due poli, nord e sud: ciò significa che le proprietà magnetiche sono ugualmente distribuite su tutta la materia.
Non è possibile avere un polo isolato: anche nella particella più piccola, si ritrovano le stesse caratteristiche, perché le proprietà magnetiche sono prodotte dalle cariche elettriche della materia.

I magneti naturali

1. Poli dello stesso nome si respingono, poli di nome contrario si attraggono.

2. Il campo magnetico terrestre è simile al campo magnetico di una sbarra magnetica che ha i poli invertiti rispetto a quelli geografici.

3. Sotto l'azione di più campi magnetici una calamita si orienta sulla risultante dei campi (linee di forza del campo terrestre, nero; linee di forza della calamita, rosso.

4. Le linee di forza del campo generato da una sbarra magnetica sono evidenziate dalla dislocazione della limatura di ferro.

5. Ogni frammento di calamita produce una nuova calamita.

Forze magnetiche

Se due cariche si muovono, l'una rispetto all'altra, alla forza che è data dalla legge di Coulomb se ne sovrappone un'altra, dovuta al movimento delle cariche, detta *forza magnetica*.
Per studiare la forza esercitata sopra una carica da altre cariche, si determina il campo elettrico **E** creato da queste cariche nel punto occupato dalla carica q. La forza risulta:

$$F = qE$$

Cercheremo ora di definire un campo magnetico **B** creato da un sistema di cariche mobili che è la causa determinante della forza esercitata su un'altra carica elettrica in movimento o sull'ago magnetico di una bussola.
L'ago di una bussola, collocata in prossimità di un filo conduttore parallelo all'ago calamitato, si pone, quando circola corrente, ortogonalmente ad esso (→ 1): ciò significa che la corrente crea un campo magnetico che le è perpendicolare. Le linee di forza del campo sono dunque circonferenze poste su piani perpendicolari alla corrente e centrate in essa (→ 2).
In tal modo si è potuto stabilire un preciso collegamento fra la corrente elettrica e il magnetismo.
Osserviamo il campo creato da una corrente circolare. Se si colloca una bussola al centro di una spira, essa si orienta secondo l'asse della spira. Il campo risultante è uguale al campo creato da una sbarra magnetica posta lungo l'asse della spira (→ 3): essi producono infatti effetti uguali.

Direzione e verso della forza magnetica
In un punto P di un campo magnetico passa una carica positiva q con velocità **v**. Questa si trova sottoposta a una forza perpendicolare alla sua velocità e dipendente dalla direzione di questa: se la velocità ha la direzione della linea di forza che passa per il punto P, la forza è nulla; se la velocità è perpendicolare alla linea di forza, la forza è massima e perpendicolare a **v** e B, nonché proporzionale al prodotto q**v**. Cioè:

$$F = Bqv$$

dove B è un vettore che, in ogni punto, ha la direzione della linea di forza corrispondente: il suo modulo misura il valore del campo magnetico. È detto *induzione magnetica* e si misura in weber/m^2.

Forza magnetica su una corrente rettilinea
Si prenda un tratto rettilineo di un conduttore orientato perpendicolarmente a un campo magnetico B. La corrente elettrica è costituita da cariche in movimento (elettroni), su ciascuna delle quali il campo magnetico esercita una forza F = Bqv, perpendicolare al campo e alla corrente.
Se n è il numero di elettroni per unità di volume, L la lunghezza del conduttore, A l'area della sua sezione retta, il volume è LA e il numero di elettroni liberi, contenuti in esso, nLA. Dato che su ciascuno agisce una forza

$$F = evB$$

la forza totale è nLAevB (dove v è la velocità media degli elettroni). Il tempo che un elettrone impiega a percorrere la lunghezza L è t = L/v. Ciò significa che in questo tempo una sezione del conduttore è stata attraversata da una carica nLAe. In un secondo la carica è:

$$i = \frac{nLAe}{L/v} = nAev$$

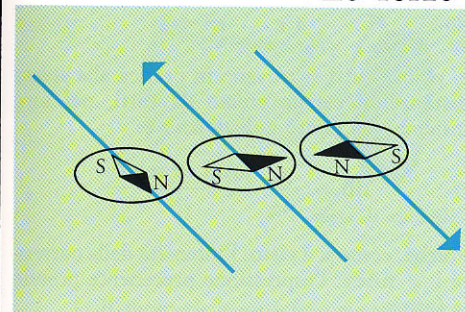
Con questa formula si ottiene l'intensità della corrente. Sostituendo nAev = i nell'espressione della forza, si ottiene: F = AnLevB = iBL.
La forza è perpendicolare al conduttore e al campo. Il suo verso (→ 5) viene dato dalla regola della vite destrorsa.

Forza magnetica su spira e su solenoide
Consideriamo una spira rettangolare (con i lati a,b), situata in un campo magnetico B perpendicolare ai lati di lunghezza a (→ 6). Le forze che agiscono su detti lati costituiscono una coppia con momento magnetico

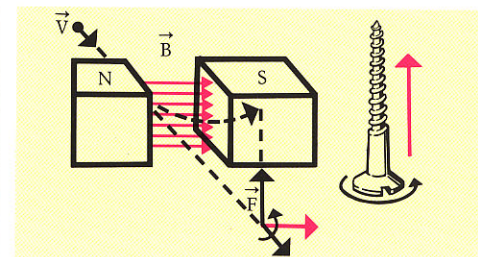
$$Biab \text{ sen } \theta,$$

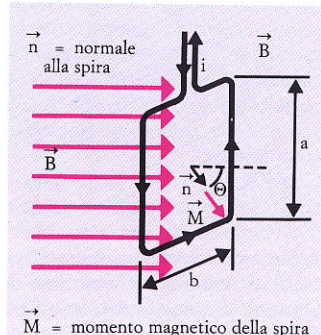
dove θ è l'angolo che il campo **B** forma con la normale **n** della spira. Le forze che agiscono sui lati di lunghezza b si annullano l'una con l'altra.
Un solenoide è costituito da un numero N di spire parallele percorse tutte dalla medesima corrente. Si dice *momento magnetico* del solenoide il prodotto:

$$M = NBiab \text{ sen } \theta$$

Le forze magnetiche

1. Se la corrente genera un campo magnetico la bussola si dispone perpendicolare rispetto al filo.

2. Quando un filo è percorso da corrente, le linee di forza del campo magnetico che ne deriva sono circonferenze su piani perpendicolari al filo e centrate in esso. Il verso del campo è dato dalla vite destrorsa che procede con la corrente.

3. Una spira circolare genera un campo magnetico uguale a quello di una sbarra magnetica posta lungo l'asse della spira.

4. Una carica positiva si muove perpendicolarmente a un campo magnetico: su di essa agisce una forza perpendicolare al campo e alla velocità, di modulo F = qvB (il verso è dato dalla vite destrorsa).

5. Un conduttore di lunghezza L percorso da corrente e immerso in un campo magnetico è soggetto a una forza perpendicolare al piano di L e di B.

6. Il momento magnetico di una spira percorsa da corrente.

Campi magnetici

Campo magnetico creato da una carica mobile
L'esperimento di Rowland, che per primo dimostrò come il moto di uno strato carico elettrostaticamente produce un campo magnetico (→ 1), costituisce la prova migliore per verificare che il campo magnetico è creato dal movimento delle cariche costitutive delle correnti elettriche.
Ammettiamo, senza ricorrere alla dimostrazione, che quando una carica q si muove con velocità v, in un punto P a distanza r dalla carica si ha un'induzione magnetica espressa da:

$$\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\,v\,\mathrm{sen}\,\theta}{r^2}$$

dove θ è l'angolo che forma il vettore velocità **v** con la direzione che unisce la carica con il punto P, nel quale si calcola l'induzione; μ_0 è una costante detta *permeabilità magnetica* del vuoto, che nel sistema MKS ha il valore $4\pi\cdot10^{-7}$ N/A^2. Le linee di forza del campo giacciono sul piano H passante per P e normale al vettore velocità: esse sono circonferenze orientate nel senso di una vite destrorsa che avanza nel verso della velocità **v** (→ 2). Quando la carica in moto è negativa si ha l'orientazione opposta per le linee di campo (→ 3).

Campo magnetico prodotto da un elemento di corrente
La formula precedente permette di determinare il contributo al campo magnetico, creato da una corrente, da parte degli elementi in cui possiamo considerarla divisa. Per calcolare il campo creato da una corrente in un circuito, si suddivide il percorso in tratti molto piccoli e si calcola il campo originato da ciascuno in un certo punto; componendo vettorialmente tutti i contributi, si ha il campo creato dalla corrente complessiva.
Come si determina il campo $d\vec{B}$ dovuto a un tratto molto corto dl (→ 4): se indichiamo con n il numero di elettroni liberi per unità di volume del conduttore, in un tratto dl si hanno nAdl elettroni (A è la sezione del conduttore). Ognuno di questi crea, in un punto a distanza r, un campo:

$$\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{ev\,\mathrm{sen}\,\theta}{r^2}$$

e, poiché tutti si trovano in pratica alla stessa distanza, il campo creato da tutti, nel loro insieme, nel punto a distanza r è:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{nAdl\,ev\,\mathrm{sen}\,\theta}{r^2}$$

Poiché, come si è visto, l'intensità della corrente i = nAev, l'espressione precedente prende la forma:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,dl\,\mathrm{sen}\,\theta}{r^2}$$

Campo magnetico al centro di una spira
Calcoliamo adesso l'induzione magnetica nel centro di una spira circolare. Si prenda un segmento qualsiasi, molto corto, di lunghezza dl: il campo **dB**, che dl crea nel punto P centro della spirale, è normale al piano A, determinato da dl e P: il piano della spirale (→ 5). Poiché il risultato è questo, quale che sia il segmento scelto, tutti i **dB** creati in P dai diversi segmenti dl hanno la stessa direzione e verso.
La loro somma è un altro vettore di uguale direzione e verso, il cui modulo è dato dalla somma dei moduli; basta quindi sommare i moduli di tutti i contributi al campo:

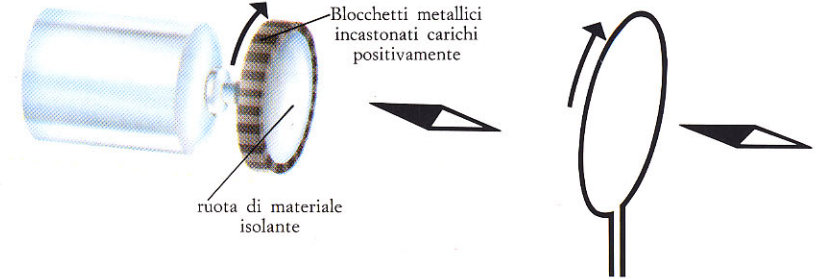
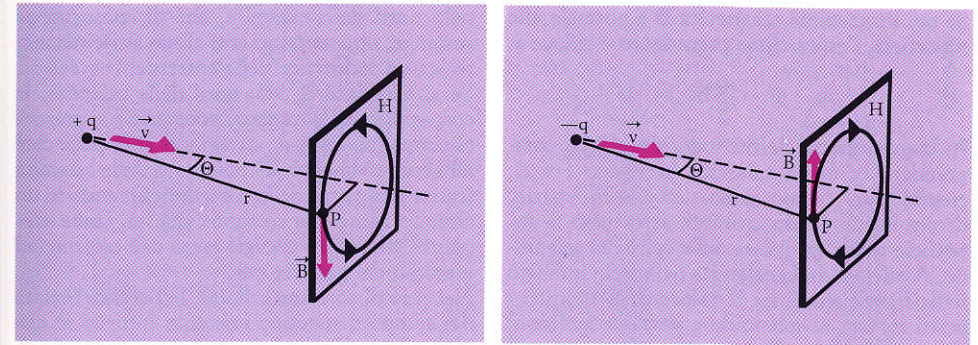
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i\,dl\,\mathrm{sen}\,\theta}{r^2}$$

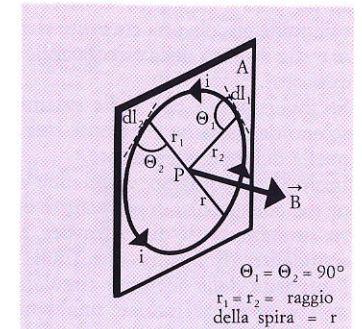
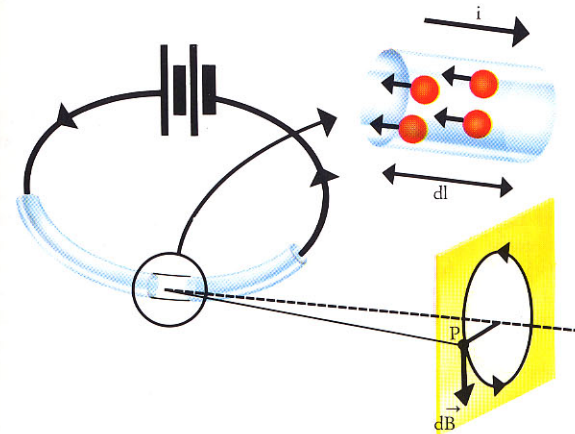
Per tutti i segmenti il raggio non cambia, come non cambia i; sen θ = 1, perché il raggio è sempre perpendicolare a dl. Nella somma si può mettere in evidenza il fattore comune alle quantità menzionate:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i}{r^2}\Sigma dl \quad [\Sigma = \text{sommatoria}]$$

La somma di tutti i dl è peraltro la lunghezza della circonferenza 2πr. Perciò:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i}{r^2}2\pi r = \mu_0\frac{i}{2r}$$

I campi magnetici

1. Il moto delle cariche genera campi magnetici: facendo girare una ruota carica elettrostaticamente si ottiene un campo magnetico analogo a quello della spira percorsa da corrente.

2. Il campo magnetico creato in un punto P dal moto di una carica positiva.

3. Il campo magnetico creato in un punto P dal moto di una carica negativa.

4. Il campo magnetico generato in un punto P da un elemento dl percorso da corrente.

5. Una spira circolare percorsa da corrente: nel centro il campo magnetico è perpendicolare alla spira e ha modulo $B = \mu_0\ i/2r$.

Induzione elettromagnetica

L'*induzione elettromagnetica* è il fenomeno per cui i campi magnetici sono capaci, in determinate condizioni, di creare una corrente in un circuito.
Supposto di avere una superficie di area A situata in un campo magnetico, viene definito *flusso magnetico* o *flusso di induzione magnetica* attraverso quella superficie il prodotto dell'area A della superficie per la proiezione di **B** sulla normale (→ 1). Designato con θ l'angolo che **B** forma con la normale alla superficie, il flusso Φ attraverso di essa è:

$$\Phi = AB \cos\theta.$$

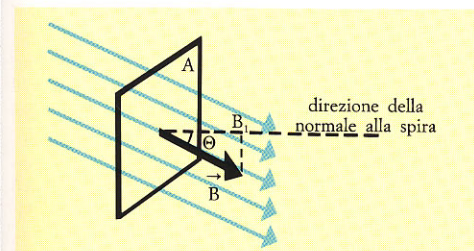
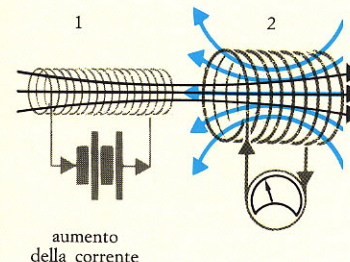
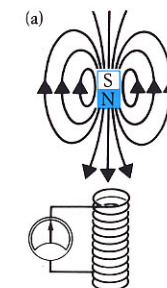
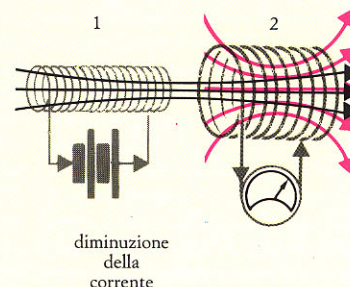
Se poi l'induzione magnetica **B** è normale alla superficie, l'espressione precedente si riduce a:

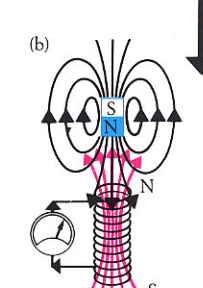
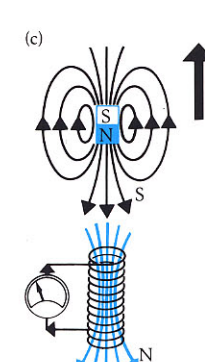
$$\Phi = AB.$$

In base a questa definizione è possibile comprendere come la calamita in riposo (→ 2), creando un campo magnetico nello spazio, determini un flusso costante attraverso la superficie totale racchiusa dalle spire del solenoide. Avvicinando la calamita nel modo indicato nella figura, aumenta il valore di **B** in tutti i punti interni al solenoide e pertanto cresce il flusso Φ; se la allontaniamo, diminuisce il valore di **B** e, di conseguenza, anche il flusso attraverso il solenoide.
In un caso e nell'altro si osserva che entro il solenoide circola una corrente che si dice *indotta* e che il senso della circolazione è nei due casi opposto.
Se invertiamo i poli della calamita rispetto al solenoide, si ha una corrente indotta opposta a quella del caso precedente.
Inoltre, se poniamo vicini due solenoidi – il primo collegato a un generatore e l'altro chiuso su se stesso – si dimostra per mezzo di uno strumento di misura che, non appena varia l'intensità della corrente circolante nel primo, nel secondo si induce una corrente, la cui intensità dipende dalla variazione di intensità della prima e non dal suo valore (→ 3).
Se l'intensità della corrente che circola nel solenoide 1 non varia, nel solenoide 2 non circola corrente.
In sintesi, ogni variazione del flusso magnetico attraverso un circuito induce una corrente: questo fenomeno è detto *induzione elettromagnetica*.
Un aspetto fondamentale di questo fenomeno è espresso dalla *legge di Lenz*: il senso della corrente indotta tende a opporsi alla causa che la origina (→ 2b).
Quando si avvicina il polo nord della calamita, aumenta il campo e di conseguenza anche il flusso attraverso il solenoide. La corrente indotta origina un flusso di senso contrario, perché il campo prodotto da questa corrente si oppone al campo creato dalla calamita, cioè si oppone all'aumento del flusso. In altre parole, si può dire che la corrente indotta crea un polo nord all'estremo del solenoide più vicino al polo nord della calamita, che di conseguenza respinge, opponendosi così al suo avvicinamento (causa induttrice della corrente) (→ 2c).
Se si allontana il polo nord della calamita, la corrente indotta ha senso contrario e si presenta come una forza di attrazione: si oppone cioè all'allontanamento del polo nord della calamita (causa induttrice della corrente). Quando in un circuito passa una corrente, questa, come sappiamo, disperde l'energia presa dall'esterno (ad esempio dal generatore).
Nel caso di corrente indotta, l'energia è fornita dal campo magnetico esistente intorno al circuito. In ogni campo magnetico si ha, infatti, un'energia distribuita con una densità (energia per unità di volume) che, in ogni punto del campo, è:

$$\frac{B^2}{2\mu}$$

dove B è il valore dell'induzione magnetica in quel punto, μ una costante caratteristica del mezzo (*permeabilità magnetica*), con valore μ_o per il vuoto. L'energia attinta dall'esterno perché circoli l'unità di carica, è pari alla *forza elettromotrice*. Faraday ha dimostrato che la forza elettromotrice indotta in un circuito è uguale alla velocità di variazione del flusso che lo attraversa; se in un tempo molto breve (dt) il flusso attraverso il circuito cresce di dΦ, la forza elettromotrice indotta vale —dΦ/dt. Il segno – si deve al fatto che la forza elettromotrice si oppone, secondo la legge di Lenz, alla variazione del flusso da cui ha origine.

L'induzione elettromagnetica

1. Il flusso di induzione magnetica attraverso una superficie A è $\Phi = AB \cos\theta$.

3. Aumentando la corrente nel solenoide 1 si induce una corrente in 2 che crea un campo magnetico opposto a quello inducente (sopra).
Se si diminuisce la corrente nel solenoide 1 viene indotto un campo magnetico che si somma a quello inducente (sotto).

2. Corrente indotta in un solenoide.

a. una calamita ferma di fronte a un solenoide non induce corrente;

b. se si avvicina il polo nord della calamita, il campo magnetico generato dalla corrente indotta ha il polo nord diretto verso la calamita in modo da ostacolarne l'avanzamento;
c. se allontaniamo la calamita, la corrente indotta circola in verso opposto, per contrapporsi alla diminuzione del flusso concatenato al solenoide;

d. avvicinando il polo sud della calamita, il campo magnetico generato dalla corrente indotta ha il polo sud diretto verso il polo sud della calamita.

e. allontanando la calamita si inverte il senso della corrente.

Proprietà magnetiche della materia

Consideriamo un solenoide costruito in modo da generare un intenso campo magnetico (→ 1); vorremmo stabilire se, ponendo materiali diversi all'interno del campo, essi vadano soggetti o meno a forze di qualche tipo. Osserviamo, in primo luogo, che le sostanze si possono dividere in tre categorie: *sostanze diamagnetiche*, debolmente respinte (acqua, piombo, grafite, → 2); *sostanze paramagnetiche*, debolmente attratte (sodio, alluminio, cristalli di cloruro di rame, → 3); *sostanze ferromagnetiche* (ferro, cobalto, nichel, → 4), fortemente attratte.

Per stabilire le cause delle diverse fenomenologie è necessario ricorrere ad un'analisi microscopica, in cui considerare i fenomeni magnetici come dovuti ad anelli di corrente nella materia. Se si divide un corpo in frammenti, ciascuno rappresenterà una porzione della sostanza; procedendo in questa operazione si arriva fino a frammenti tanto piccoli che, divisi ancora, non hanno più le caratteristiche originali.

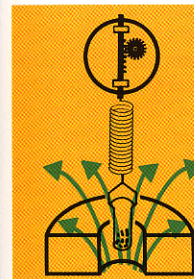
La frazione più piccola di una sostanza, che conserva le proprietà primitive, è la *molecola*. Nella molecola esistono cariche elettriche in movimento; una carica ruotante costituisce un anello di corrente che crea, come è noto, un momento magnetico **M**. Se alcune cariche girano in un senso, altre in un altro, compensando i reciproci effetti, la molecola non possiede momento magnetico proprio: è il caso delle molecole dei corpi diamagnetici.

Supposto che ogni carica sia accompagnata da un'altra uguale che gira in senso contrario, e che sia applicato dall'esterno un campo magnetico, questo induce su di esse la stessa azione esercitata su due spire percorse da corrente in senso opposto: una coppia di forze di senso contrario che tendono a muovere le spire in senso inverso.

Viene meno con questo la compensazione e nasce un momento magnetico complessivo, opposto al campo magnetico inducente. La molecola acquista polarità tali da respingere l'elettromagnete esterno. Gran parte dei composti inorganici, e pressoché tutti i composti organici, sono diamagnetici: il diamagnetismo infatti è una proprietà di ogni atomo o molecola. Il comportamento opposto si osserva solo quando il diamagnetismo viene sopraffatto da un effetto diverso e più forte, che produce l'attrazione magnetica.

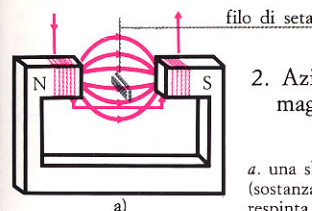
Nei corpi paramagnetici non si ha piena compensazione degli effetti dei moti delle cariche: ogni molecola possiede un piccolo momento magnetico proprio, in realtà è una piccola calamita. In assenza di campo magnetico esterno, le molecole delle sostanze paramagnetiche presentano un moto caotico per effetto dell'agitazione termica; il momento magnetico risulta perciò nullo e la sostanza non magnetizzata (→ 5).

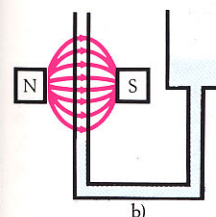
Se applichiamo un campo magnetico, questo agisce sulle molecole orientandole come piccole bussole: esse creano un campo magnetico dello stesso verso dell'induttore (→ 6), responsabile dell'attrazione rispetto all'elettromagnete esterno. In taluni casi, soprattutto per quanto riguarda i metalli, il paramagnetismo non presenta un effetto molto più forte del comune diamagnetismo; invece l'effetto paramagnetico è molto più forte e aumenta con il diminuire della temperatura, in materiali come il cloruro di rame. Alle basse temperature il moto di agitazione termica è molto ridotto e sono sufficienti deboli campi esterni per indurre magnetizzazione. L'aumento del paramagnetismo, con il diminuire della temperatura, è in parte responsabile della forza intensa che si registra nell'ossigeno liquido (→ 3b). Il fatto che i corpi ferromagnetici calamitino come i paramagnetici è indizio della presenza di calamite molecolari, ordinate spazialmente anche in assenza di campo magnetico esterno: in un cristallo ferromagnetico, ad esempio, le direzioni di magnetizzazione spontanea sono legate alla struttura cristallina (→ 7). Si hanno dunque zone contigue pienamente ordinate, dette *domini di Weiss*, individuabili anche al microscopio. Se portiamo in un campo magnetico anche debole del materiale ferromagnetico, sono privilegiati i domini con magnetizzazione spontanea nella direzione del campo: essi espandono i loro confini a spese dei domini più vicini, in virtù della mutua interazione tra i momenti magnetici di una sostanza ferromagnetica. Si dice che il campione ha raggiunto la *saturazione magnetica* quando è diventato un unico dominio magnetizzato secondo il campo magnetico esterno. Si dicono *magneti permanenti* alcuni materiali ferromagnetici in cui questa magnetizzazione permane anche dopo lo spegnimento del campo magnetico esterno.

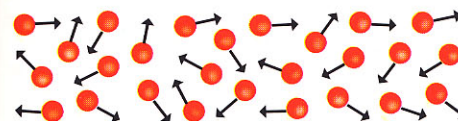
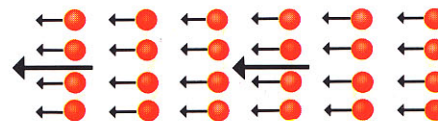
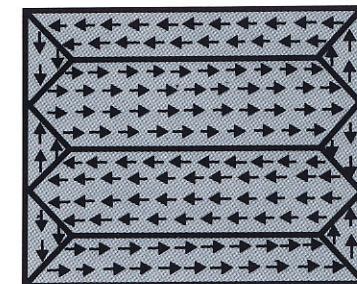
Le proprietà magnetiche della materia

1. L'intensità e il verso della forza a cui è soggetto un corpo in un campo magnetico dipendono dal tipo di materiale.

3. Azione di campi magnetici sulla materia:

a. un'ampolla contenente cloruro di rame (sostanza paramagnetica) si orienta come una sbarretta di ferro;

b. l'ossigeno liquido (a 90 °K) è paramagnetico e sale nel tubo per attrazione del campo magnetico.

2. Azione di campi magnetici sulla materia:

a. una sbarretta di grafite (sostanza diamagnetica, è respinta dai poli di una elettrocalamita e si orienta perpendicolarmente alle linee del campo;

b. l'acqua (sostanza diamagnetica) scende nel tubo, respinta da un campo magnetico.

4. Una calamita attrae energicamente il ferro (sostanza ferromagnetica) e lo magnetizza.

5. In una sostanza paramagnetica non soggetta a campo magnetico il moto delle molecole si presenta caotico.

6. In presenza di campo magnetico le molecole prendono una direzione e il materiale si magnetizza.

7. I domini di Weiss in un cristallo ferromagnetico.

Campi elettrici e magnetici su cariche in moto

Lo studio dei problemi del moto nelle particelle cariche per l'azione di campi elettrici o magnetici, è detto talora *balistica elettronica*; si possono infatti stabilire analogie tra questo settore e la balistica classica: le particelle cariche vengono infatti utilizzate, in alcuni casi, dalla tecnica moderna, appunto come proiettili.
In natura esistono varie particelle cariche: gli elettroni, i protoni, le particelle alfa, ecc., tutte con dimensioni tanto piccole da essere considerate punti materiali. Si può dunque limitare il problema considerando le cariche elettriche puntiformi di carica q e di massa m.

Moto di una carica in un campo elettrico
Una carica elettrica q, situata in un punto dove esista un campo elettrico **E**, è sottoposta a una forza q**E** avente la stessa direzione del campo e verso identico od opposto, a seconda che la carica q sia positiva o negativa.
Tale forza imprime alla carica un'accelerazione **a**; perciò, se la massa della particella è m, avremo:

$$q\mathbf{E} = m\mathbf{a}$$

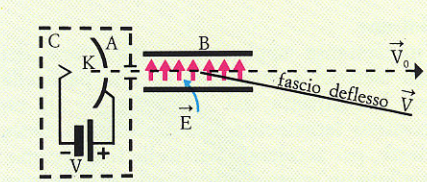
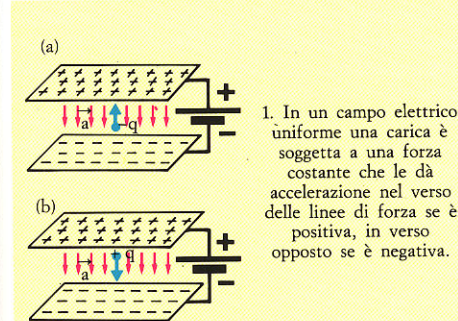
ovvero $\mathbf{a} = q\mathbf{E}/m$.
Se il campo **E** ha direzione, verso e modulo uguali in tutti i punti di una regione dello spazio (campo elettrico uniforme), ad esempio tra le armature di un condensatore piano, l'accelerazione della particella è la stessa in tutti i punti (→ 1).
Se si lancia una carica con velocità iniziale non diretta secondo una linea di forza, avviene sempre che l'incremento di energia cinetica della carica q, al passare da un punto A a un punto B, è uguale alla variazione di energia potenziale: $q(V_B - V_A)$.
L'*elettron-volt*, una nuova unità di energia, si definisce perciò come l'energia che un elettrone acquista nel passare da un punto a un altro, quando tra questi punti esista una differenza di potenziale di 1 V. Poiché la carica di un elettrone è $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, l'elettron-volt (eV) equivale a un'energia di $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.
In → 2 è rappresentato il caso in cui la velocità iniziale del fascio di elettroni è perpendicolare al campo deflettente; in → 3 si dà la rappresentazione schematica di un oscillografo (o tubo a raggi catodici). Gli elettroni, emessi dal catodo per effetto termoionico, vengono prima accelerati e fuocheggiati da una serie di elettrodi che costituiscono il cannone elettronico. Passano poi attraverso due coppie ortogonali di piastrine parallele (*placchette di deflessione*), andando a colpire uno schermo all'estremità del tubo a vuoto, ricoperto di una sostanza fluorescente; quando le placchette non sono connesse a nessun segnale (campo elettrico), al centro dello schermo si osserva una macchia luminosa corrispondente all'immagine del fascio non deflesso.
Applicando alle placchette orizzontali un segnale comunque variabile nel tempo (differenza di potenziale) e a quelle verticali un segnale *a dente di sega* (→ 4), è possibile visualizzare il segnale V, che varia nel tempo sullo schermo fluorescente. Nel caso di tensione alternata è possibile, ad esempio, misurarne il periodo dalla sinusoide (→ 5) che appare sullo schermo.

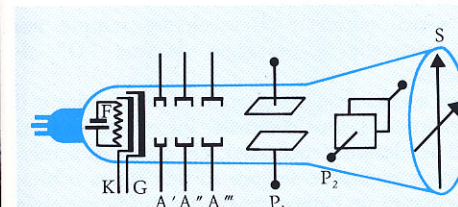
Moto di una carica in un campo magnetico uniforme
Si è visto che una carica q, muovendosi perpendicolarmente a un campo magnetico **B**, con una velocità **v**, è sottoposta a una forza F = qvB, perpendicolare sia a **v** che a **B**. Una forza, in ogni momento perpendicolare alla traiettoria, non effettua lavoro, in quanto l'energia cinetica rimane costante (teorema delle forze vive); se il campo è uniforme, **B** ha lo stesso valore in tutti i punti; il moto che ne risulta è circolare e uniforme, con **F** forza centripeta (→ 6).
Si ha dunque: $qvB = mv^2/R$ da cui si ricava: $R = mv/qB$; il raggio della traiettoria circolare, descritta da una carica elettrica in moto entro un campo magnetico con velocità ad esso perpendicolare, è proporzionale alla velocità costante v. Il tempo impiegato per compiere un giro completo (il *periodo di rivoluzione*) è:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = 2\pi \frac{m}{qB}$$

dove si vede come il periodo sia indipendente dalla velocità della particella e dal raggio della traiettoria.

Cariche in moto nei campi elettrici e magnetici

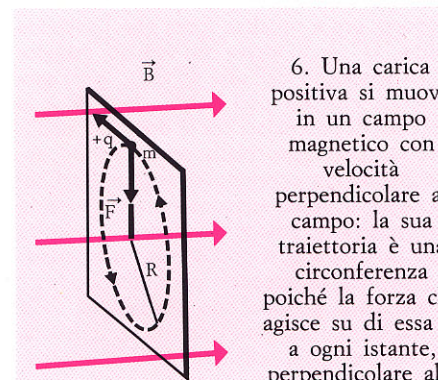
1. In un campo elettrico uniforme una carica è soggetta a una forza costante che le dà accelerazione nel verso delle linee di forza se è positiva, in verso opposto se è negativa.

C = cannone di elettroni emessi per effetto termoionico dal catodo incandescente K accelerati dal potenziale V verso l'anodo A
B = piatti di deflessione

2. Gli elettroni con velocità iniziale perpendicolare alle linee di forza vengono attratti dal campo elettrico.

F = filamento
K = catodo
G = griglia di controllo
A', A'', A''' = anodi
P_1 = placchette di deflessione verticale
P_2 = placchette di deflessione orizzontale
S = schermo fluorescente

3. Raffigurazione schematica di un tubo a raggi catodici.

d.d.p.
t
tempo necessario a percorrere lo schermo

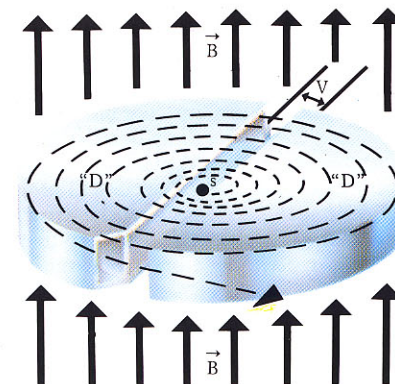
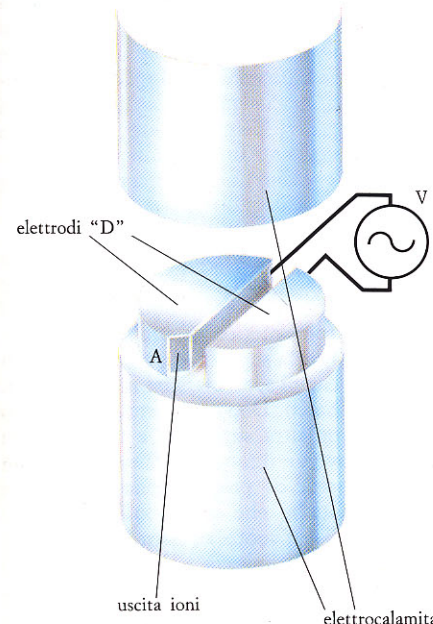
4. Andamento della tensione applicata alle placche deflettrici verticali che comandano il movimento orizzontale del pennello elettronico.

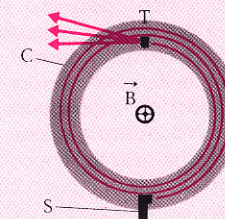
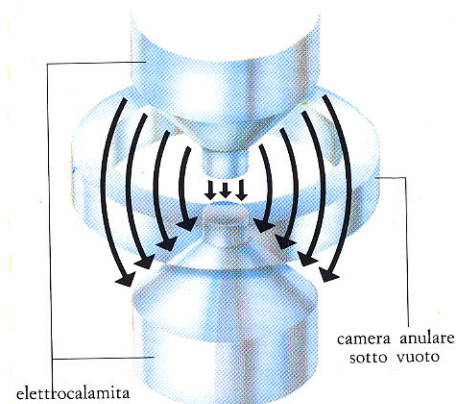
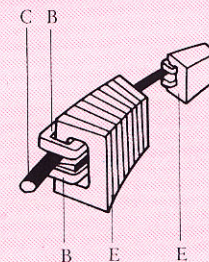
5. Un esempio di segnale sinusoidale ottenuto mediante l'oscilloscopio.

6. Una carica positiva si muove in un campo magnetico con velocità perpendicolare al campo: la sua traiettoria è una circonferenza poiché la forza che agisce su di essa è, a ogni istante, perpendicolare alla velocità.

Gli acceleratori di particelle

Ciclotrone
Un'interessante applicazione dell'azione dei campi elettrici e magnetici su una particella carica è costituita dal *ciclotrone* (→ 1), un dispositivo largamente impiegato nella fisica nucleare, per accelerare particelle fino a comunicare loro un'energia sufficiente a disintegrare gli atomi.
Le parti essenziali di un ciclotrone sono: l'elettrocalamita, che crea un campo magnetico uniforme; due elettrodi di rame, in forma di "D", che danno origine insieme a una cavità cilindrica perpendicolare al campo magnetico; un generatore di alta tensione, che applica fra le due "D" una differenza di potenziale alternata; una sorgente S di ioni, situata in prossimità del centro delle "D", che fornisce le particelle cariche da accelerare. L'insieme dell'elettrocalamita e delle "D" è contenuto in un recipiente a tenuta, dove è praticato il vuoto.
Il campo elettrico (esistente fra le due "D") porta una particella carica, generata in S, verso una delle due: la particella penetra, all'interno, con una certa velocità iniziale. Il campo elettrico esiste solo fra le due "D", ed è nullo all'interno dei due conduttori. Una volta entrata nella "D", la carica si trova perciò sottoposta soltanto al campo magnetico che le fa descrivere una traiettoria semicircolare, avvicinandosi ai bordi in un tempo $T/2 = \pi m/qB$. Proprio in questo tempo si inverte il senso del campo elettrico alternato: la particella è sottoposta ora a un'altra forza che l'avvicina all'altra "D", a cui arriva con velocità maggiore. Nel passaggio dall'una all'altra, guadagna un'energia cinetica pari a qV, dove V è la differenza di potenziale tra le due "D" nell'istante del passaggio. Nella seconda "D" avviene quanto era avvenuto nella prima, sebbene il raggio della semicirconferenza ($R = mv/qB$) sia maggiore, poiché maggiore è la velocità v della particella. Il tempo impiegato a percorrere la semicirconferenza è però identico ($\pi m/qB$), perché il periodo non dipende né dalla velocità né dal raggio. Una volta giunta al bordo e invertito il senso del campo, la particella guadagna di nuovo una energia cinetica qV e così di seguito, ad ogni passaggio dall'una all'altra "D", e aumentando, di volta in volta, il raggio finché questo non sia tanto grande che la particella si trovi vicino alla parete esterna della struttura a "D" e passi nell'*estrattore* (costituito, in genere, da una coppia di piastre a cui è applicata un'alta tensione). Ecco dunque che la carica emerge da A con una energia cinetica nqV, dove n è il numero di volte che è passata da una "D" all'altra.

Betatrone e sincrotone
Il ciclotrone non serve ad accelerare gli elettroni, perché la loro massa è tanto piccola che la loro velocità si avvicina a quella della luce per energie cinetiche relativamente basse. In tali condizioni, sappiamo dalla teoria della relatività che la massa non si mantiene costante e, di conseguenza, nemmeno il periodo di rivoluzione, per cui si perderebbe il sincronismo con un campo alternato, il fattore che, come si è visto, permette di accelerare sempre più le particelle al passaggio da una "D" all'altra.
Per accelerare gli elettroni fu perciò ideato il *betatrone*. L'idea originale, introdotta in tutti gli acceleratori successivi, era quella di accelerare le particelle sempre su una stessa orbita, mediante un campo magnetico-guida variabile nel tempo. Per poter seguire l'aumento della velocità, il campo deve aumentare in modo che gli elettroni ruotino sempre sullo stesso cerchio. La sorgente s è un cannone elettronico, posto sul lato esterno della camera anulare sotto vuoto (→ 2).
L'elettrone emesso percorre un'orbita circolare, e ciò equivale ad avere una corrente circolare in un campo magnetico variabile.
Alla fine del ciclo, gli elettroni incontrano un bersaglio T su cui inducono potenti fasci di raggi X. Il campo magnetico ritorna quindi al valore iniziale ed il ciclo riprende. Anche qui, come nel ciclotrone, è indispensabile un grande magnete che copra tutta la camera a vuoto, con linee di forza incurvate in modo da obbligare gli elettroni a percorrere sempre la stessa circonferenza (→ 3). Il magnete limita le possibilità dell'apparecchio intorno ai 300 Mev. Per tale motivo al betatrone, non più utilizzato come strumento di ricerca, è stato sostituito il *sincrotone*, in cui si hanno, al posto dell'enorme magnete, una serie di piccoli magneti disposti ad anello intorno alla camera a vuoto (→ 4).

Acceleratori di particelle

S = sorgente di ioni

1. Il ciclotrone: sopra, ricostruzione schematica della struttura; sotto, particolare degli elettrodi e traiettoria degli ioni.

2. Betatrone: la camera ad anello. Gli elettroni sono accelerati da un campo elettrico indotto dalla variazione di un campo magnetico.

3. Nel betatrone le linee di forza più esterne del campo magnetico risultano concave verso l'interno in modo da riportare le particelle nell'orbita prevista.

4. Il sincrotone: particolare delle bobine B degli elettromagneti E intorno alla camera anulare C.

Forze magnetiche

Correnti di spostamento
Durante la carica o la scarica di un condensatore, avviene il passaggio di cariche elettriche da un'armatura all'altra, attraverso un circuito esterno, sede della corrente elettrica (*corrente di conduzione*). Tra le armature del condensatore, è presente, in genere, un materiale isolante (*dielettrico*), come aria o vetro. Nel dielettrico, come è noto, non si spostano cariche, non esiste perciò corrente (→ 1). Tuttavia, si può osservare che nel dielettrico si produce un campo magnetico uguale a quello che si avrebbe se la corrente circolante attraverso il circuito esterno passasse attraverso il dielettrico per distribuirsi in esso.
A questa corrente (che non è di conduzione) si dà il nome di *corrente di spostamento*: è distribuita in ogni dielettrico dove esista un campo elettrico variabile (→ 2). Da tutto ciò si deduce che *in ogni punto in cui vi sia un campo elettrico variabile esiste anche un campo magnetico derivante da esso*. L'enunciato è generale e non limitato al campo di un condensatore in regime di carica e scarica. Lo studio attento di questo fenomeno, complementare a quello dell'induzione elettromagnetica in cui ogni campo magnetico variabile crea un campo elettrico, si fonda sulle *equazioni di Maxwell*.
Da questa analisi si rileva che in ogni punto dello spazio, dove esista un campo elettrico (o magnetico) con variazione periodica, c'è un campo magnetico (o elettrico) periodico della stessa misura, perpendicolare all'altro, e che si annulla, cresce o diminuisce con esso.

Onde elettromagnetiche
In una regione dello spazio esiste un campo magnetico periodico. Si consideri in questa un piccolo volume dV cubico (→ 3), con due facce parallele al piano determinato dai vettori **E** e **B**. L'energia, dovuta a questi campi e contenuta nel volume dV, è:

$$\left(\frac{1}{2}\varepsilon_o E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_o}\right) dV$$

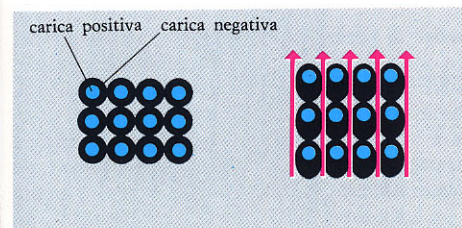
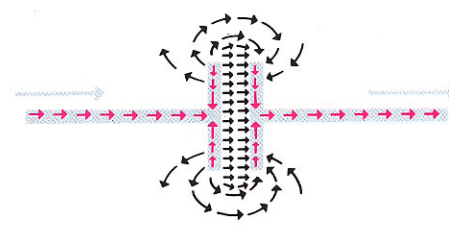
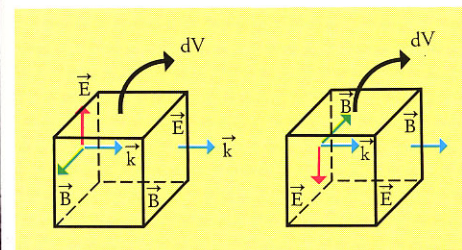
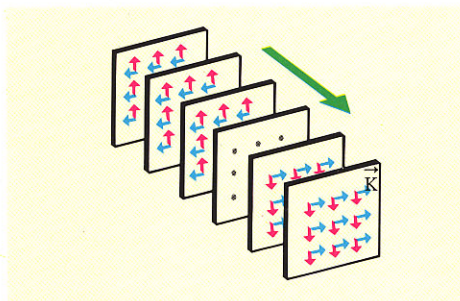
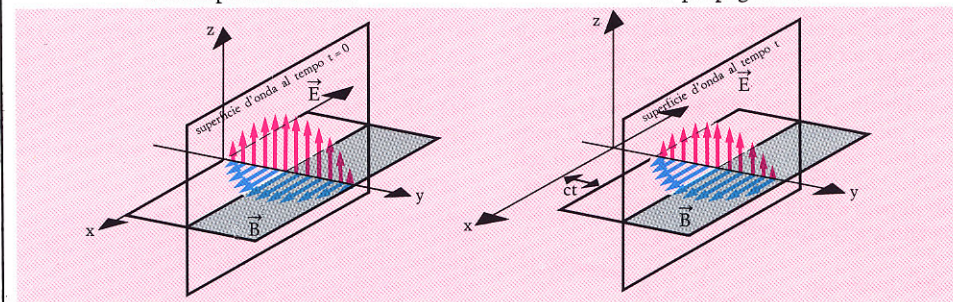
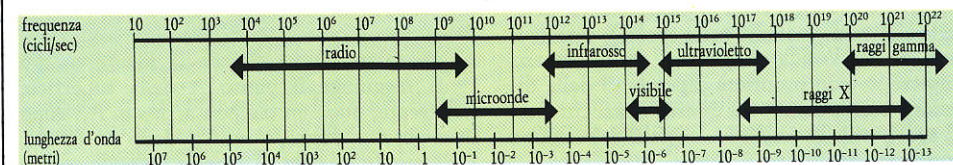
Questa energia cresce al crescere simultaneo dei campi e ciò non può che dipendere dall'ingresso di energia nel volume. Dallo studio della teoria elettromagnetica risulta che l'energia del campo elettromagnetico si propaga sempre in maniera perpendicolare ai campi e nella direzione in cui avanza una vite destrorsa che, girando, trasporti **E** su **B**. Successivamente, i campi diminuiscono fino ad annullarsi (→ 4): ciò significa che diminuisce l'energia contenuta nel volume.
I campi crescono quindi nel verso opposto, anche se il verso di propagazione dell'energia rimane immutato, non invertendosi il verso di un solo campo ma di entrambi. L'energia del campo elettromagnetico si propaga così per onde: su una certa superficie e a un determinato istante, i campi sono massimi in tutti i punti (*superficie d'onda*). Dopo un certo tempo t, ciò avviene su un'altra superficie a una distanza pari a ct, dove t è il tempo considerato mentre c è la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche che (secondo la teoria di Maxwell) è, per il vuoto, di circa $3 \cdot 10^8$ m/sec, quale che sia l'ampiezza e la frequenza del campo elettromagnetico (→ 5). In realtà, dalla teoria di Maxwell risulta che la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica, in un mezzo di costante dielettrica ε e permeabilità magnetica μ, è

$$v = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$$

Sostituendo ε e μ con i loro valori nel vuoto (ε_o, μ_o), si ha il risultato numerico citato.
Sappiamo che ε_o è una costante universale, ma la costante dielettrica ε di un qualsiasi mezzo è funzione della frequenza del campo elettromagnetico: in altre parole, la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche attraverso un mezzo materiale dipende dalla loro frequenza. (Per lo spettro delle onde elettromagnetiche, → 6).
Il legame tra la lunghezza d'onda λ e la frequenza ν di una radiazione che si propaga nel vuoto è

$$\lambda = c/\nu$$

dove c è la velocità della luce.

Le onde elettromagnetiche

1. Le molecole di un dielettrico si polarizzano per l'azione di un campo elettrico determinando uno spostamento di cariche.

2. Corrente di conduzione e corrente di spostamento durante la carica e la scarica di un condensatore (la prima corrente in rosso, l'altra in nero).

3. L'energia si propaga sempre secondo $\vec{k}$, poiché **E** e **B** si invertono contemporaneamente

4. Variazione dei campi elettrici e magnetici lungo la direzione di propagazione.

5. Superficie d'onda di un campo elettromagnetico che si propaga con velocità c lungo l'asse y.

6. Lo spettro delle onde elettromagnetiche.

L'ottica

Propagazione della luce

L'ottica è il settore della fisica che studia la luce e, più in generale, i fenomeni in cui interviene la luce. La luce fu studiata fino dall'antichità; già allora si fecero numerosi tentativi per misurarne la velocità di propagazione. A questo proposito una soluzione fu trovata dall'astronomo danese Römer: il metodo da lui seguito (→ 1) era fondato sull'osservazione che la differenza di percorso tra uno dei satelliti di Giove e la Terra (quando Giove e la Terra si trovano nelle posizioni 1 e 2) corrisponde in pratica al diametro dell'orbita terrestre. Nella posizione 2, si vede apparire il satellite dal bordo di Giove con un ritardo di 16 minuti e 26 secondi: il rapporto tra il diametro dell'orbita terrestre e questo ritardo dà la velocità della luce. Römer rilevò un valore di $3 \cdot 10^8$ m/sec, un risultato che fu confermato da successive misurazioni, come quelle di Fizeau (→ 2) e di Michelson (→ 3). Il valore che se ne ricava concorda con il valore della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, calcolato in base alla teoria di Maxwell.
Secondo Maxwell le *onde luminose* sono *onde elettromagnetiche*: l'ipotesi fu confermata in seguito da Hertz, che riprodusse con queste i fenomeni di riflessione e rifrazione e verificò le leggi note per la riflessione e la rifrazione della luce. Il carattere ondulatorio della luce era già stato riconosciuto grazie agli studi di Fresnel e Foucault.
In definitiva, si può affermare che la radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa, nel vuoto, fra 4000 œA e 7000 œA (1 œA = 10^{-10} m), impressiona la retina dell'occhio umano e si dice *radiazione luminosa* o, più brevemente, *luce*.

Raggio luminoso

Le traiettorie percorse dall'energia trasportata dall'onda luminosa si dicono *raggi luminosi*; come già si è visto, essi sono normali alle superfici d'onda (si veda la propagazione delle onde elettromagnetiche nello spazio), a parte il caso in cui l'onda si propaga in un mezzo anisotropo (con proprietà dipendenti dalla direzione considerata); fra questi mezzi citiamo, ad es., i cristalli (esclusi i cristalli del sistema monometrico).

Indice di rifrazione

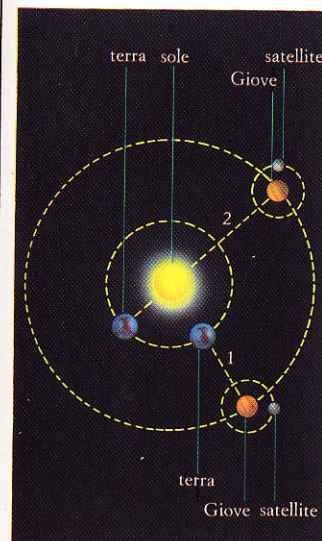
Un'onda luminosa di frequenza determinata si propaga nei vari mezzi con velocità che è caratteristica del mezzo stesso. In ottica è utilizzato, più ancora della velocità di propagazione della radiazione luminosa, l'*indice di rifrazione* n nel mezzo, che si definisce: n = c/v, dove c è la velocità della luce nel vuoto e v la velocità della radiazione luminosa nel mezzo in questione (→ 4). Poiché v dipende dalla frequenza della radiazione, l'indice di rifrazione varia al variare della frequenza (→ 5).

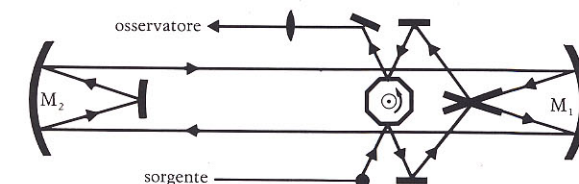
Principio di Huygens-Fresnel

Il meccanismo di propagazione e i fenomeni che producono i moti ondulatori di qualsiasi specie possono essere interpretati con l'aiuto del principio di Huygens, adattato da Fresnel alle onde luminose, per provare la natura ondulatoria della luce.
Il principio stabilisce che *ogni punto raggiunto da un'onda diventa un centro emittente di onde secondarie di uguale frequenza e l'inviluppo di queste costituisce il nuovo fronte d'onda* (→ 6).
Secondo il principio di Huygens, nello spazio in cui si propaga l'onda elettromagnetica, si generano due fronti d'onda, uno che si propaga nello stesso senso del moto ondulatorio (*onda progressiva* → 6) e l'altro in senso opposto (*onda regressiva*). L'intervento di Fresnel dimostrò l'inesistenza di questa onda regressiva che si distrugge per un fenomeno di interferenza.

La riflessione

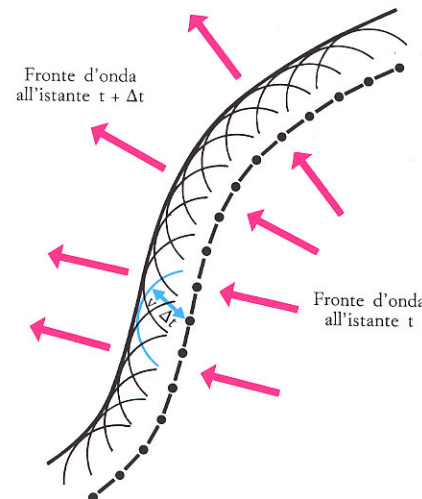
Quando la luce incide sulla superficie di separazione di due mezzi diversi, i punti di questa superficie diventano centri emittenti di onde secondarie (il loro inviluppo costituisce il nuovo fronte d'onda). La velocità di propagazione di queste onde secondarie, nel mezzo in cui si propaga l'onda incidente, è uguale alla velocità di questa.
In un certo istante, l'onda incidente (p. 65 → 1) raggiunge il punto A della superficie riflettente; dopo un tempo t arriva in A_1; dopo 2t è in A_2; dopo 3t in A_3; dopo 4t in A_4. Nell'istante iniziale, A emette un'onda secon-

La propagazione della luce

1. Schema del metodo di Römer per la determinazione della velocità della luce.

2. Il metodo di Fizean permette di calcolare la velocità della luce senza osservazioni astronomiche, misurando il tempo impiegato da un raggio di luce a coprire una distanza di 17266 m. La ruota dentata introduce soltanto brevi impulsi di luce.

3. Metodo di Michelson. Il principio è simile a quello adottato da Fizeau. La luce della sorgente giunge all'osservatore soltanto per particolari velocità di rotazione degli specchi disposti a ottagono.

Sostanza	Indice di rifrazione n
vuoto	1
aria	1.000 293
idrogeno	1.000 132
anidride carbonica	1.000 45
acqua	1.333
alcool etilico	1.361
diamante	2.419
ambra	1.55
silicato fuso	1.458

4. L'indice di rifrazione di alcune sostanze.

5. Indice di rifrazione n in funzione della frequenza ν. L'indice di rifrazione della luce visibile cresce con l'aumento della frequenza.

6. L'inviluppo delle onde elementari, emesse dai punti investiti da un'onda, costituisce il nuovo fronte d'onda.

daria che, trascorso un tempo 4t, giunge a una distanza da A pari ad AB = v 4t, dove v è la velocità di propagazione.
Nello stesso istante, l'onda secondaria, emessa da A_1 a un tempo t dall'istante iniziale, avrà un raggio A_1B_1 = v 3t, mentre quella emessa da A_2 avrà un raggio A_2B_2 = v 2t, e quella emessa da A_3, A_3B_3 = v t. I raggi delle onde secondarie sono quindi proporzionali alle distanze dei loro centri da A_4 e BA_4 = AB'; l'inviluppo delle onde secondarie costituisce così il piano tangente comune ad esse, che passa per A_4. La proporzionalità suddetta fa sì che i triangoli ABA_4 e $AB'A_4$ siano triangoli rettangoli simili con ipotenusa comune (cioè uguali). Gli angoli i, formati dall'onda incidente con la superficie riflettente, e l'angolo r, formato con la stessa superficie dall'onda riflessa, sono uguali fra loro e uguali rispettivamente agli angoli, formati dai raggi incidente e riflesso con la normale alla superficie, che determinano il piano su cui giace la normale.
Queste sono le leggi della riflessione: 1. *Il raggio incidente, quello riflesso e la normale si trovano in un medesimo piano*; 2. *L'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.*

La rifrazione

La velocità di propagazione della luce varia a seconda dei mezzi attraversati (→ 2).
Indichiamo con v_1 la velocità nel primo mezzo e con v_2 quella nel secondo. In un tempo 4t, l'onda incidente percorre la distanza BA_4 = = v_1 4t, mentre l'onda secondaria emessa da A avrà percorso

$$AC = v_2 \cdot t$$

Se r' è l'angolo di rifrazione, cioè l'angolo che l'onda trasmessa forma con la superficie di separazione dei mezzi, abbiamo:

$$BA_4 = AA_4 \text{ sen } i \qquad AC = AA_4 \text{ sen } r'$$

e dividendo:

$$\frac{BA_4}{AC} = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'}$$

Poiché:

$$\frac{BA_4}{AC} = \frac{v_1 4t}{v_2 4t} = \frac{v_1}{v_2}$$

si ha:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'} = \frac{v_1}{v_2}$$

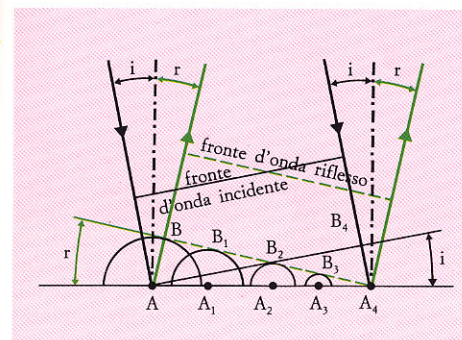
che si può scrivere anche:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r'} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

dove n_1 è l'indice di rifrazione del primo mezzo, n_2 quello del secondo; n_{21} è detto *indice di rifrazione relativo* del secondo mezzo rispetto al primo.
Dalla formula ottenuta si ricava che se $n_2 > n_1$ allora $r' < i$, ovvero il raggio rifratto è più vicino alla normale di quanto non sia il raggio incidente (→ 3).
Viceversa, se $n_1 > n_2$, il raggio rifratto è più lontano dalla normale (→ 5).
In questo caso esiste un angolo limite di incidenza a cui corrisponde un angolo di rifrazione r' = 90°; se l'angolo d'incidenza è superiore all'angolo limite, non si ha angolo rifratto, ma solo raggio riflesso (*riflessione totale*).

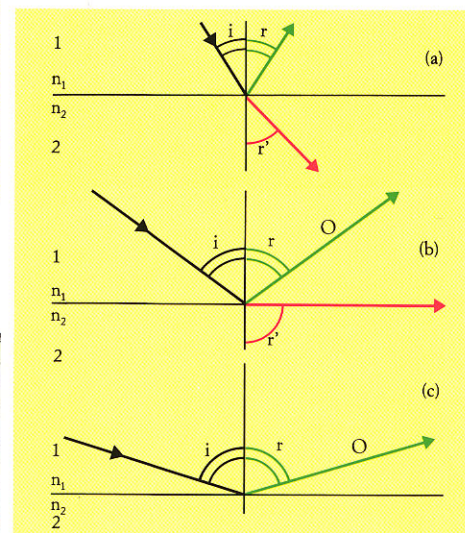
La dispersione

L'indice di rifrazione di un mezzo dipende dalla frequenza. Per radiazioni visibili possiamo affermare che, di norma, è una funzione crescente della frequenza (p. 63 → 5).
Questo significa che i fenomeni di rifrazione sono più accentuati per le radiazioni di frequenza più elevata e meno per le frequenze basse.
Il fenomeno si può osservare (→ 4) facendo passare attraverso un prisma della luce bianca (che è quella che contiene tutte le radiazioni visibili): i raggi subiscono così una deviazione; si può notare che le radiazioni di minor frequenza (quelle rosse) deviano molto meno delle frequenze più elevate, come la violetta. A questo fenomeno viene dato nome di *dispersione*.

La rifrazione, la riflessione e la dispersione

1. Il fenomeno della riflessione secondo il principio di Huygens.

2. La rifrazione: l'onda incidente (in nero), l'onda rifratta (in rosso), l'onda riflessa (in verde).

3. L'indice di rifrazione del mezzo 1 è inferiore a quello del mezzo 2 ($n_1 < n_2$). L'angolo r' è minore di i: la rifrazione ha luogo sempre.

4. La dispersione della luce attraverso un prisma triangolare di vetro.

5. L'indice di rifrazione del mezzo 1 è maggiore di quello del mezzo 2 ($n_1 > n_2$). Quindi $i < r'$. Esiste un angolo limite di incidenza per il quale r' = 90°; se i è maggiore di tale angolo non si ha più raggio rifratto.

La diffrazione

Un treno di onde piane incide su un ostacolo sul quale esiste una piccola fenditura (→ 1). I punti dell'ostacolo e quelli della fenditura diventano, secondo il principio di Huygens, centri emittenti di onde secondarie. Queste onde, a parte quelle generate dalla fenditura, non possono progredire e formano l'onda riflessa che ritorna indietro; quelle emesse dai bordi della fenditura passano invece nel secondo mezzo e qui si propagano in forma di onde sferiche. La direzione di propagazione delle onde (raggi) cambia dopo che queste hanno toccato l'ostacolo. Il fenomeno è detto *diffrazione*, e si verifica quando la trasmissione rettilinea delle onde viene alterata. La diffrazione di un suono attraverso una porta o una finestra (fenomeno frequente nella pratica quotidiana) era conosciuta già ai tempi di Newton; la diffrazione della luce è invece più difficile da sperimentare, e proprio questo fatto indusse Newton a non considerare la luce come un fenomeno ondulatorio.

Il fenomeno descritto si può anche materializzare in un recipiente contenente acqua, sulla cui superficie siano sollevate piccole onde per mezzo di una bacchetta. Aumentando a poco a poco la grandezza della fenditura, si osserva che, quando l'apertura è più grande della lunghezza d'onda, i fenomeni di diffrazione sono assai meno percettibili (→ 2); per renderli visibili, bisogna che le dimensioni della fenditura (ostacolo o agente diffrattore) siano dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda del moto ondulatorio. Poiché la lunghezza d'onda della luce è molto piccola, si comprende quanto sia difficile mettere in evidenza la diffrazione della luce usando i mezzi tradizionali.

L'interferenza

Un altro fenomeno caratteristico dei moti ondulatori è l'*interferenza*, cioè la sovrapposizione di moti ondulatori che procedono da sorgenti coerenti. Si dicono *sorgenti coerenti* due centri che emettono onde di uguale frequenza, le quali mantengono invariata la loro differenza di fase; per maggiore chiarezza, conviene supporre che si trovino costantemente in concordanza di fase. È difficile disporre di sorgenti coerenti, senza far ricorso a dispositivi che le producano da sorgenti uniche (l'eccezione sono i laser).

Mezzi classici per ottenere queste sorgenti sono le finestre di Young (→ 3) e il prisma doppio di Fresnel (→ 4).

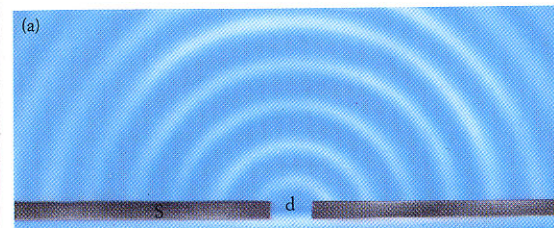
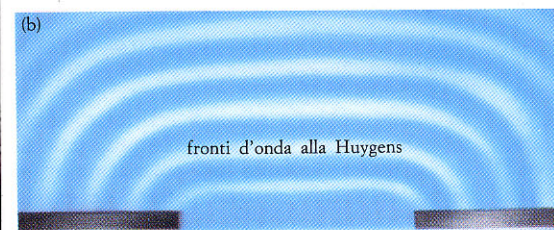
L'aspetto più interessante dell'interferenza luminosa è il maggiore o minor grado di brillantezza (o di oscurità) che troviamo in un punto qualsiasi quando si sovrappongono due onde. Se queste si trovano in concordanza di fase, i due vettori elettrici hanno sempre la stessa direzione e danno come risultante un altro vettore elettrico, con la stessa direzione e con modulo pari alla somma dei due moduli (→ 5a); l'ampiezza che ne risulta è uguale alla somma delle ampiezze, e l'energia luminosa che incide nel punto di sovrapposizione è molto grande. Questo avviene per i punti in cui la differenza di percorso dei due raggi è zero o un multiplo della lunghezza d'onda: si dice allora che in questo punto vi è *interferenza costruttiva*. In altri punti, le onde sono invece in opposizione di fase, e i due vettori elettrici risultano di verso contrario e la loro risultante ha per modulo la differenza dei moduli.

Con i dispositivi di cui si è detto usati nella produzione di sorgenti coerenti, i due vettori elettrici sono di modulo uguale, per cui la differenza è nulla (→ 5b). In detto punto si ha pertanto oscurità assoluta. Ciò avviene dove i raggi che interferiscono hanno una differenza di percorso pari a un numero dispari di semilunghezze d'onda: si dice, in tal caso, che si produce un'*interferenza distruttiva*.

Nei casi intermedi fra interferenza costruttiva e interferenza distruttiva l'intensità luminosa è intermedia. Se si pone uno schermo nella regione in cui si sovrappongono le onde coerenti, si ottiene una successione di zone chiare e zone scure; nel caso in cui le sorgenti siano fenditure (→ 3), si ottengono *frange di interferenza*. Al centro dello schermo si ha sempre una frangia brillante, corrispondente a una differenza nulla di percorso, essendo il centro dello schermo un punto equidistante dalle due sorgenti coerenti.

Ritornando in → 5, indichiamo con a la separazione fra le sorgenti coerenti e con D la distanza fra esse e lo schermo; con un semplice calcolo si dimostra che le frange brillanti si trovano a distanza dalla frangia centrale in O uguale a:

$$O = \frac{D\lambda}{a}, \frac{2D\lambda}{a}, \frac{3D\lambda}{a} \ldots$$

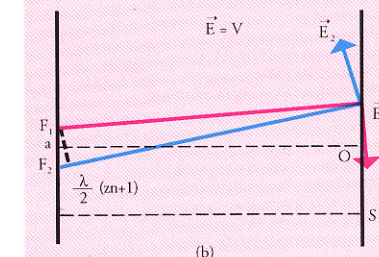
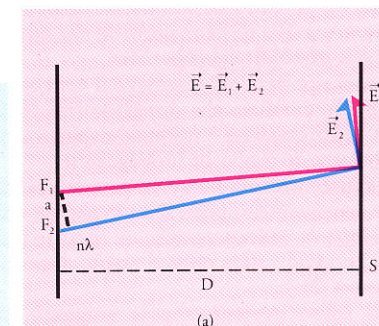
L'interferenza

1. Un treno di onde piane incide su una piccola fenditura e questa emette onde sferiche.

2. Se aumenta l'ampiezza della fenditura, i fenomeni di diffrazione si osservano solo ai bordi.

3. L'esperienza di Young: da una sola sorgente si ottengono due sorgenti coerenti F_1 e F_2.

4. Il prisma doppio di Fresnel. Le immagini S_1 e S_2 della sorgente S, date dai prismi A e B, sono due sorgenti coerenti. Nella zona di intersezione dei due fasci di raggi si ha interferenza.

5. L'interferenza prodotta da due fenditure:

a. campi elettrici in fase (interferenza costruttiva);

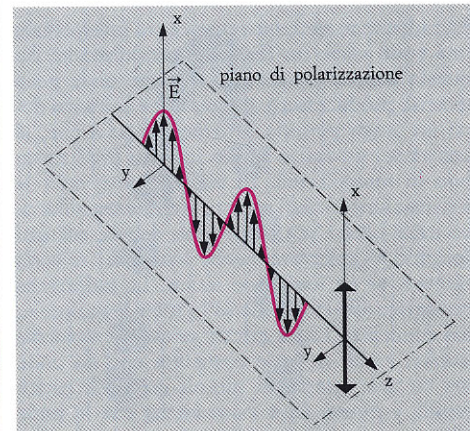
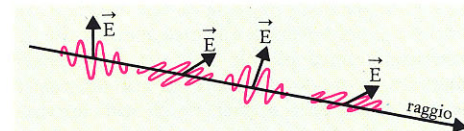
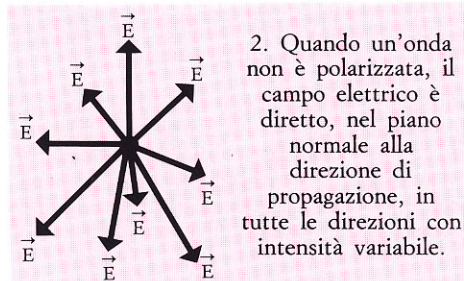
b. campi elettrici in opposizione di fase (interferenza distruttiva). (n = 1, 2, 3, ...)

Le frange oscure a distanza pari a:

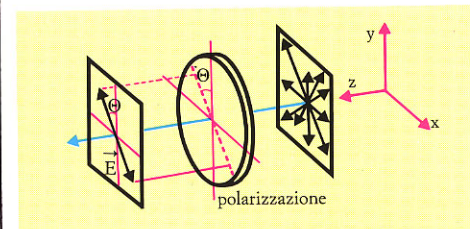
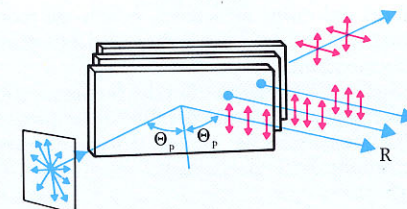
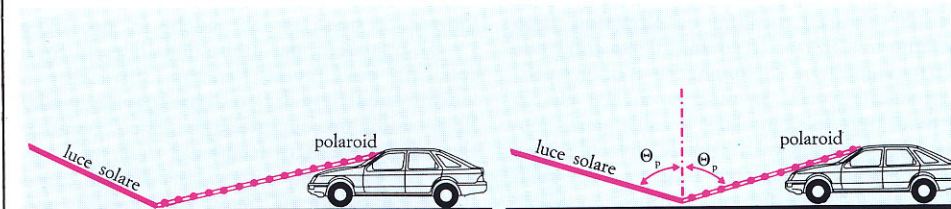
$$\frac{D\lambda}{2a}, \frac{3D\lambda}{2a}, \frac{5D\lambda}{2a} \dots$$

dove λ è la lunghezza d'onda della luce.
È facile comprendere come misurando semplicemente la distanza di una frangia qualsiasi dalla frangia brillante centrale, sia possibile determinare la lunghezza d'onda λ della luce impiegata.

La polarizzazione

I fenomeni ottici visti fin qui, già conosciuti prima della enunciazione della teoria elettromagnetica della luce di Maxwell, rendono evidente che la luce si propaga per mezzo di onde, ma niente se ne può ricavare sulla loro natura, se esse cioè siano longitudinali o trasversali. Un terzo fenomeno, la *polarizzazione* della luce, permise ai fisici che vennero prima di Maxwell di affermare che la propagazione si svolge per onde trasversali.
Quando la vibrazione si trasmette in una direzione fissa (perpendicolare a quella di propagazione), si dice che l'onda è *polarizzata su un piano* (→ 1) e il piano normale alla vibrazione è detto *piano di polarizzazione*.
La luce polarizzata mantiene il vettore elettrico sempre parallelo alla direzione fissata; il piano di polarizzazione è normale rispetto a questa e contiene il raggio di propagazione.
La luce naturale non è in genere polarizzata e se, per assurdo, potessimo guardare un raggio di luce, lo vedremmo vibrare in tutte le direzioni perpendicolarmente al raggio di propagazione (→ 2).
Di solito avviene che le sorgenti luminose emettono (→ 3) una serie di treni d'onda molto corti, dell'ordine del metro di lunghezza, ciascuno polarizzato in una direzione diversa: si può quindi osservare una simmetria quasi perfetta rispetto al raggio di propagazione.
Alcune apparecchiature sono in grado di sopprimere alcune direzioni di vibrazione, o di ridurre l'ampiezza della vibrazione in talune direzioni: si dice, in questo caso, che la luce è parzialmente polarizzata (→ 4).
È quanto avviene con il raggio riflesso, quando quello incidente non sia polarizzato; in questo caso, variando l'angolo di incidenza, si può ottenere che il raggio riflesso e quello rifratto siano perpendicolari. Il raggio riflesso risulta in tal caso completamente polarizzato nel piano di incidenza: il vettore elettrico del raggio riflesso è normale al piano formato dal raggio e dalla normale. Il fatto è noto come "legge di Brewster" (→ 5).
In natura esistono minerali (calcite, quarzo, tormalina, ecc.) che hanno la proprietà di lasciar passare soltanto luce polarizzata in un piano: dei vettori elettrici, presenti nel raggio che attraversa la sostanza, passa solo la componente normale al piano di polarizzazione. Per ottenere luce polarizzata il sistema più semplice è l'uso dei *polaroid*, strati cristallini di iodiosolfato di chinina racchiusi tra due strati di plastica. Sono cristalli di forma molto allungata orientati prevalentemente nella stessa direzione grazie a un campo elettrico molto intenso: il *polaroid* lascia così passare solo la luce polarizzata su un piano. Infatti viene fortemente assorbita la componente parallela alla catena dei cristalli orientati. Si utilizza in strumenti di laboratorio e anche per evitare il riflesso prodotto dalla luce solare su una strada, una luce molto polarizzata nel piano di incidenza. Se si dispone di un parabrezza (o di occhiali) polarizzati, si evita il riverbero (→ 6).

La polarizzazione

1. Il campo **E** oscilla in una direzione fissa; l'onda è polarizzata sul piano perpendicolare a tale direzione.

2. Quando un'onda non è polarizzata, il campo elettrico è diretto, nel piano normale alla direzione di propagazione, in tutte le direzioni con intensità variabile.

3. Un raggio di luce bianca è composto da brevi treni d'onda in piani diversi.

4. Un polarizzatore permette il passaggio di una determinata direzione del campo elettrico.

5. La luce bianca incide sui vetri con un angolo Θ_p (uguale all'angolo di Brewster). La luce riflessa è polarizzata linearmente.

6. La luce del sole è polarizzata quasi interamente nel piano d'incidenza. Se il parabrezza dell'automobile è di materiale polarizzato in quella direzione, si elimina il riflesso.

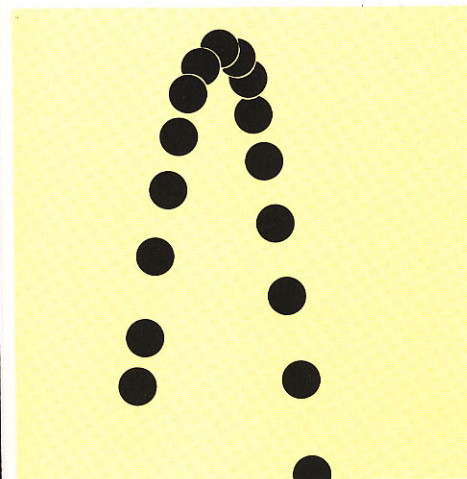
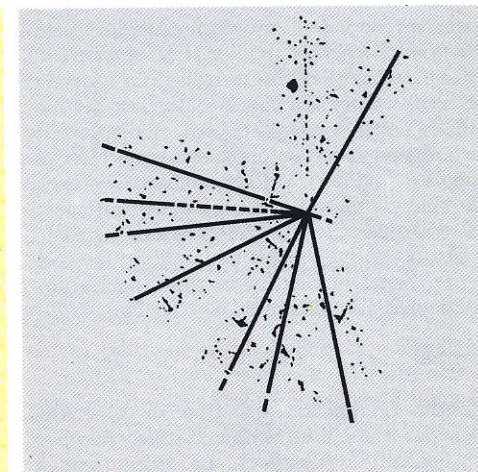
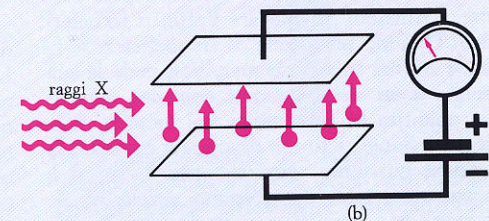
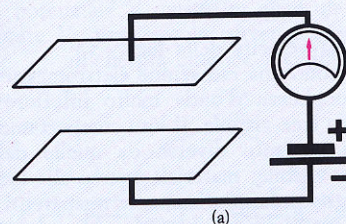
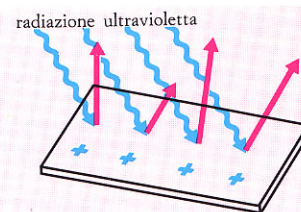
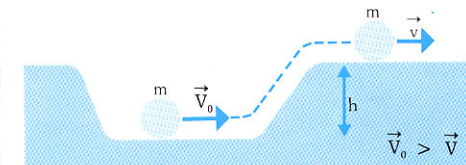
La fisica del mondo atomico

Ionizzazione e fotoelettricità

Gli oggetti visibili, magari grazie all'aiuto di strumenti ottici, costituiscono ciò che si definisce il mondo *macroscopico*; il mondo *submicroscopico* è costituito invece da corpi che possono essere percepiti solo attraverso determinati attributi, come l'energia cinetica o la quantità di moto.
Un elettrone in moto non può essere osservato come si fa per una una palla da tennis (→ 1). Il concetto si può estendere a tutte le particelle di dimensioni tanto piccole che non è possibile osservare in modo diretto e di cui possiamo descrivere solo certi effetti (→ 2): sono appunto questi che ci possono dire se una particella si comporta come un corpuscolo o come un'onda, ma certo non se la particella sia questa o quella cosa. Un elettrone, ad esempio, è un "qualcosa", fornito di carica elettrica, che siamo soliti rappresentare come un corpuscolo dotato degli attributi dei corpi meccanici, o con un moto ondulatorio che è, a sua volta, un fatto puramente meccanico.
Le possibili rappresentazioni dei fenomeni submicroscopici permettono peraltro di far progredire la conoscenza del mondo fisico e di interpretare i risultati sperimentali.

Ionizzazione di un gas
Un gas è costituito da un gran numero di particelle (*molecole*), che si muovono in libertà. Ogni molecola ha una carica elettrica totale nulla. Quando si applica una differenza di potenziale fra due placche (in mezzo alle quali si trovi solo gas) fra l'una e l'altra non passa corrente (→ 3a). Se irradiamo il gas con onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda sufficientemente corta, si osserva invece che la corrente prende a circolare: le onde elettromagnetiche liberano elettroni dalle molecole, questi vanno verso la placca positiva e passano quindi al circuito esterno (→ 3b). Le molecole che hanno perduto elettroni, si dicono *ionizzate*; hanno una carica elettrica totale positiva per cui vengono attratte dalla placca negativa: da questa prendono gli elettroni perduti e tornano così ad essere molecole neutre.
Per liberare un elettrone da una molecola, occorre fornire una certa quantità di energia.
La radiazione elettromagnetica era interpretata una volta come un fenomeno ondulatorio. Su questa base si poteva pensare che onde poco intense producessero ionizzazione soltanto dopo un lungo periodo di irradiazione e che, al contrario, un fascio molto intenso producesse ioni in tempi brevi. In realtà, non è così: la ionizzazione è quasi sempre simultanea all'arrivo delle onde. Se queste sono deboli, ad ogni secondo si ionizzano poche molecole; se sono intense, se ne ionizzano molte. La radiazione nonagisce allo stesso modo su tutte le molecole, ma concentra i suoi effetti su alcune molecole isolate, come se fosse costituita non da onde ma da uno sciame di piccoli proiettili molto rapidi, i *fotoni*. Si è visto anche che le onde elettromagnetiche possono comportarsi come corpuscoli.

Effetto fotoelettrico
La seconda evidenza da analizzare è l'*effetto fotoelettrico*. Un'onda elettromagnetica di *frequenza sufficientemente elevata* che incida su un metallo, libera elettroni (→ 4): è quello che avviene nelle *cellule fotoelettriche* e il meccanismo è simile a quello della ionizzazione. Per liberare un elettrone è necessario dargli almeno un'energia minima (*energia di estrazione*), caratteristica di ogni metallo. Se si fornisce questa energia nella quantità esatta, l'elettrone esce dal metallo privo di energia cinetica; se invece gli si dà un'energia superiore a quella di estrazione, l'elettrone ne consuma una parte (per uscire) e trattiene l'altra parte sotto forma di energia cinetica.
Questo processo avviene anche in meccanica (→ 5): una sfera, per uscire dalla buca in cui è collocata deve avere l'energia sufficiente a vincere la barriera di potenziale gravitazionale. Se si irradia una superficie metallica con onde elettromagnetiche di frequenza diversa, si osserva che esiste una frequenza di soglia f_0 tanto che le radiazioni di frequenza inferiore non producono effetto fotoelettrico (come avviene per quelle di frequenza superiore o uguale a f_0). Se la radiazione incidente fosse di frequenza inferiore a quella di soglia, non avremmo emissione di elettroni neppure se la radiazione fosse molto intensa. Ma se la frequenza è superiore a f_0, c'è sempre emissione di elettro-

Ionizzazione e fotoelettricità

1. Il moto di un oggetto macroscopico (ad esempio, una palla da tennis) può essere descritto istante per istante.

2. Le particelle submicroscopiche non sono direttamente osservabili; si possono però studiare le tracce che lasciano su lastre fotografiche.

3. Ionizzazione di un gas:
a. se si applica una differenza di potenziale a due placche (fra le quali c'è gas), non passa corrente;
b. se si irradia il gas con raggi X, circola invece corrente.

4. Effetto fotoelettrico: una lamina di metallo colpita da una radiazione emette elettroni e si carica positivamente.

5. In meccanica si ha qualcosa di analogo all'effetto fotoelettrico: perché possa uscire, un corpo fermo in una buca deve ricevere un'energia sufficiente.

ni: un'emissione tanto maggiore quanto più intensa è la radiazione. Alla frequenza di soglia corrisponde il caso degli elettroni emessi ma privi di energia cinetica. Ciò permette di affermare che, nell'interazione della radiazione elettromagnetica con la superficie dei metalli, la prima si comporta come uno sciame di fotoni, non come un'onda continua. Con un apposito sistema (→ 1) si può misurare l'energia cinetica massima dei fotoelettroni emessi da una superficie, con frequenza di soglia f_o. Variando la frequenza f della radiazione incidente, l'energia cinetica massima risulta proporzionale alla differenza $f - f_o$, cioè:

$$E_c \max = h(f - f_o) = hf - hf_o$$

Mentre f_o dipende dal tipo di superficie metallica usata, h ha sempre lo stesso valore ($h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ Joule/sec). La spiegazione è fornita dalla *teoria quantistica* di Planck; secondo questa teoria l'energia irradiata da un corpo si presenta in piccoli pacchetti, ciascuno dotato di energia pari a hf (*quanto di energia*). Un fotone è un quanto di energia e il suo contenuto energetico è proporzionale alla frequenza f della radiazione. Questa teoria permise a Einstein di spiegare l'effetto fotoelettrico. Quando un fotone di frequenza $f > f_o$ incide su una superficie metallica, cede la sua energia a un elettrone, che consuma almeno una quantità hf_o nell'uscire dal metallo. L'energia residua ha forma di energia cinetica, la massima possibile, visto che per uscire si è consumato so lo hf_o. Avremo perciò $hf = E_c \max + hf_o$, dove $E_c\max$ rappresenta l'energia cinetica massima possibile dei fotoelettroni emessi per una frequenza f di fotoni. Il tutto corrisponde alle misurazioni sperimentali e conferma la validità della teoria quantistica della luce.

Poiché l'energia cinetica non può essere negativa, dovrà essere $f \geqslant f_o$, ovvero: *per ogni emettitore di fotoelettroni esiste una frequenza di soglia* f_o *tale che le radiazioni di frequenza inferiori ad essa non possono liberare fotoelettroni* (I legge di Einstein).

Aumentando l'intensità della radiazione incidente, aumenta il numero di fotoelettroni emessi, ma non l'energia cinetica massima degli elettroni. *Per aumentare* E_c max *è necessario aumentare la frequenza della radiazione incidente* (II legge di Einstein, → 2).

Fotoni molto energetici

Raggi X

I raggi X si possono generare facendo collidere elettroni veloci con un metallo (→ 3). Nello scontro l'elettrone perde velocità, e quindi energia cinetica: questa viene trasformata, per una parte, in calore del metallo assorbente (come conseguenza degli urti subiti dall'elettrone), per un'altra, in energia radiante in seguito all'accelerazione subita. Se l'elettrone di carica e è stato accelerato da una differenza di potenziale V, la sua energia cinetica è uguale a eV; si ha quindi

$$eV = hf + \text{calore}$$

dove hf è l'energia del fotone emesso. Alcuni elettroni perdono tutta la loro energia cinetica sotto forma di radiazione: in questo caso, i fotoni ottenuti hanno energia $hf = eV$: l'energia massima dei fotoni emessi. Il fascio di raggi X ottenuti sarà composto da fotoni con lunghezza d'onda superiore a:

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} = \frac{c\,h}{eV}$$

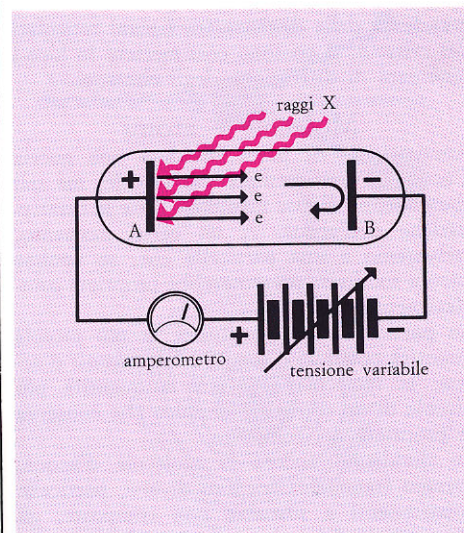
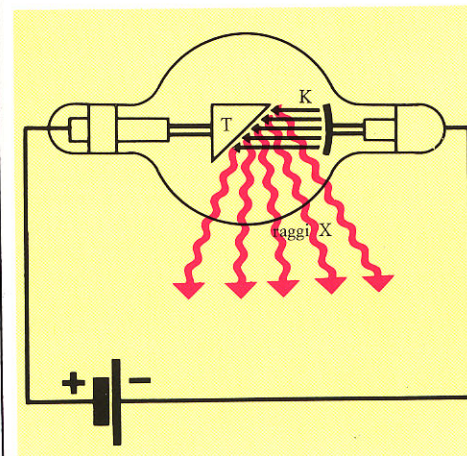
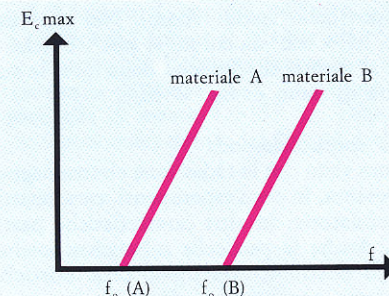
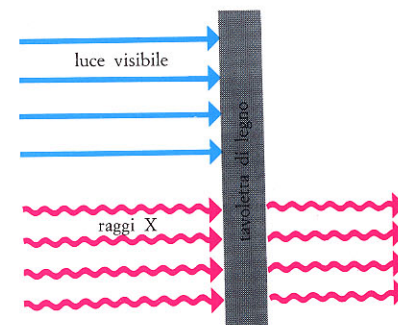
dove c è la velocità della luce.

I raggi X sono una radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda molto inferiore a quella della luce visibile. Il loro comportamento risulta pertanto diverso da quello della radiazione visibile: materiali opachi alla luce, come il legno, sono praticamente trasparenti ai raggi X (→ 4); l'utilizzazione dei raggi X nell'esame della struttura ossea del corpo umano (→ 5) si fonda proprio su questa loro caratteristica.

Effetto Compton

Anche se la teoria elettromagnetica si accorda all'emissione di raggi X, i fotoni si comportano, nell'urto con gli elettroni, come corpuscoli: quando un fotone, sufficientemente energetico, urta contro un elettrone, l'uno e l'altro deviano come due palle da biliardo che si scontrano fra loro (p. 74 → 1).

Lo scambio di energia cinetica e la quantità di moto sono retti cioè dalle stesse leggi dell'urto elastico. Per parlare di quantità di moto del fotone, occorre prima definire la *massa* del fotone. Secondo la teoria della relatività, ad

I raggi X

1. Il dispositivo sperimentale per misurare l'energia cinetica massima degli elettroni emessi per effetto fotoelettrico. Tra gli elettrodi A e B esiste una differenza di potenziale V variabile: oltre un valore limite V_m non circola corrente (corrisponde all'energia cinetica massima).

3. Un tubo a raggi X: gli elettroni vengono emessi dal catodo K e vanno a colpire la superficie T da cui si liberano raggi X.

2. La relazione tra la frequenza e l'energia cinetica massima è lineare. Il grafico si riferisce a due metalli diversi per i quali è diversa la frequenza di soglia.

4. I raggi X hanno una lunghezza d'onda molto inferiore a quella della luce visibile. Possono perciò attraversare materiali opachi alla luce.

5. Una radiografia: esempio della capacità di penetrazione dei raggi X.

ogni energia E corrisponde una massa m per cui valga la relazione $E = mc^2$ (c è la velocità della luce nello spazio vuoto). Nel caso del fotone, $hf = mc^2$ da cui $m = hf/c^2$. Poiché il fotone si muove alla velocità della luce, la sua quantità di moto è: $mc = hf/c$.

Dualità corpuscolo-onda

Abbiamo visto che la radiazione elettromagnetica presenta, in certi esperimenti, caratteristiche ondulatorie, in altri caratteristiche particellari. Anche le particelle submicroscopiche, come gli elettroni, presentano caratteristiche ondulatorie, per quanto si ricava da un esperimento di diffrazione.

La diffrazione è caratteristica dei moti ondulatori: per metterla in evidenza, bisogna che gli ostacoli siano dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della radiazione diffratta. La lunghezza d'onda dei raggi X (dell'ordine di 10^{-9} m, e anche inferiore) richiede che si ricorra a cristalli in cui la distanza tra i piani reticolari sia della grandezza della lunghezza d'onda. La diffrazione di un fascio stretto di raggi X, grazie al metodo Debye-Scherrer, dà degli anelli di diffrazione molto caratteristici: misurando i loro diametri, si può determinare con precisione la lunghezza d'onda (→ 2). Thomson e Reid, nel 1927, riuscirono a realizzare esperimenti convincenti di diffrazione degli elettroni (→ 3, 4).

L'idea che portò a queste esperienze era stata avanzata da De Broglie, nel 1924: se il fotone ha una quantità di moto $p = hf/c = h/\lambda$, da cui $\lambda = h/p$, ad ogni particella che abbia una quantità di moto p si può associare una lunghezza d'onda $\lambda = h/p$. Ciò significa che una particella può comportarsi, in determinate occasioni, come un treno d'onde caratterizzate dalla *lunghezza d'onda di De Broglie*.

Le idee di De Broglie furono pienamente confermate, quando si mise in evidenza la diffrazione dei neutroni, particelle senza carica elettrica.

L'aspetto ondulatorio della materia ha importanza solo quando la lunghezza d'onda di De Broglie è dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni geometriche del corpo preso in considerazione. Gli esempi quotidiani (→ 5) riguardano sempre lunghezze d'onda molto inferiori a quelle dell'oggetto mobile. Per gli esperimenti di Thomson e Reid, gli elettroni hanno invece una lunghezza d'onda di De Broglie pari a $7 \cdot 10^{-9}$ m, che è già dell'ordine di grandezza della distanza fra i piani reticolari dei cristalli: si possono così mettere in luce i fenomeni di diffrazione degli elettroni.

Molecole e atomi

Ammettiamo di poter dividere una goccia d'acqua in parti sempre più piccole, ma tali che ciascuna di esse mantenga tutte le caratteristiche dell'acqua. A un certo momento, arriveremo a una particella che, se venisse ancora suddivisa presenterebbe proprietà completamente difformi.

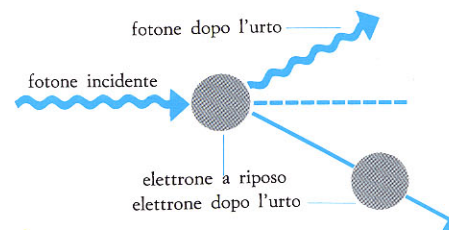
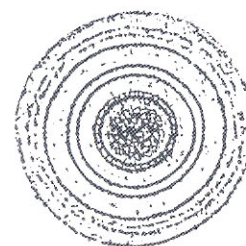
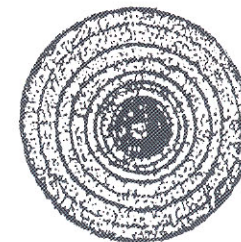
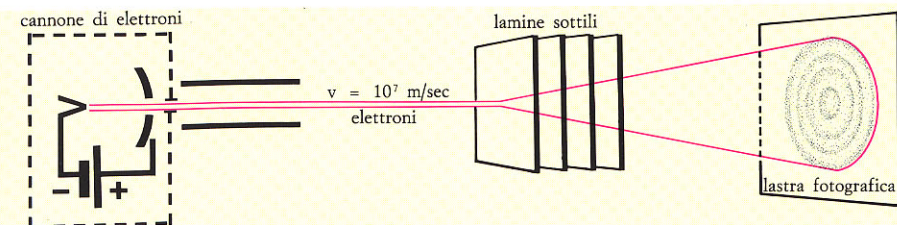
La particella, che costituisce la più piccola quantità possibile d'acqua, è la *molecola* d'acqua: la molecola è infatti la quantità più piccola di un composto chimico che conserva le proprietà del composto.

Se dividiamo ancora la molecola d'acqua, avremo frammenti fra loro diversi, particelle appartenenti a sostanze non composte, gli *elementi chimici*; nel nostro esempio, ossigeno e idrogeno. Si credeva una volta che queste particelle non fossero ulteriormente divisibili. Per questo furono chiamate *atomi* (cioè indivisibili, dal greco).

Modelli atomici

Potremmo pensare di essere arrivati, con l'atomo, alla particella elementare e che qualsiasi porzione di materia non sia altro che un'associazione di atomi. Ma l'effetto fotoelettrico e anche molti altri fenomeni stanno a dimostrare che la materia e gli atomi contengono elettroni.

Se la materia, nel suo insieme, non presenta elettrizzazione, in essa esistono, oltre agli elettroni, delle cariche positive che compensano esattamente la carica negativa degli elettroni. Questi sono emessi con relativa facilità quando scaldiamo un metallo (emissione termoionica), quando lo illuminiamo (effetto fotoelettrico), ecc. Le cariche positive invece non sono estraibili con la stessa facilità: sono, in sostanza, stabilmente legate alla massa dell'atomo. Tutto questo suggerì a Thomson il suo modello (p. 77 → 1). A ulteriore conferma, Rutherford effettuò un altro esperimento (p. 77 → 2), esponendo un foglio metallico al bombardamento di *particelle alfa* (che hanno carica doppia dell'elettrone ma positiva) emesse con grande energia da un

Dualità onda-corpuscolo

1. L'effetto Compton: nell'urto con gli elettroni i fotoni si comportano come corpuscoli. Il fotone equivale a una particella di massa hf/c^2, l'elettrone a una particella di massa $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Dopo l'urto la massa equivalente del fotone è ridotta.

2. Particelle che si comportano come treni d'onde: un fascio di raggi X che attraversa un foglio metallico dà questa figura di diffrazione. La lunghezza d'onda associata è: $\lambda = 1{,}54$ Å.

3. La figura di diffrazione prodotta da un fascio di elettroni che attraversa un foglio metallico. La lunghezza d'onda associata agli elettroni è $\lambda = 0{,}06$ Å.

4. L'esperimento di Thompson e Reid: un fascio di elettroni con velocità di 10^7 m/sec attraversa varie lamine metalliche e incide su una lastra fotografica.

5. L'aspetto ondulatorio della materia ha importanza se la lunghezza d'onda associata è dello stesso ordine di grandezza del corpo. La lunghezza d'onda di De Broglie di un'automobile del peso di 500 kg e con velocità di 200 km/h è circa 10^{38} volte più piccola della lunghezza dell'auto.

corpo radioattivo. Un campo elettrico debole, come quello che si avrebbe in un atomo secondo il modello di Thomson, provocherebbe (→ 3) piccole deviazioni per tutte le particelle. Il risultato dell'esperimento fu del tutto contrario alle previsioni. La maggior parte delle particelle alfa attraversò il foglio senza deviazione apprezzabile (il che indicava la presenza di grandi spazi vuoti); una piccola parte passò con deviazioni, in alcuni casi molto grandi. Questo testimoniava la presenza di campi elettrici molto forti e localizzati. Rutherford spiegò il risultato proponendo un modello atomico costituito da un nucleo centrale — contenente la carica positiva e praticamente tutta la massa dell'atomo — e da elettroni in rotazione intorno ad esso in modo da formare un sistema planetario in miniatura. Secondo questo modello, l'atomo risulterebbe di dimensioni molto più grandi, rispetto al nucleo, per l'esistenza, fra lo strato di elettroni e il nucleo, di un grande spazio vuoto (→ 4). In base a questo modello si comprende come le particelle alfa, che passano lontano da un nucleo, non vengano praticamente deviate dalla loro traiettoria originale, mentre quelle che passano vicino al nucleo subiscono forti deviazioni (→ 5). Il modello di Rutherford non si limitò tuttavia alle conferme qualitative: anche l'entità delle deviazioni osservate sperimentalmente concordava con le previsioni teoriche. L'atomo più semplice che si può prendere in considerazione, è quello dell'idrogeno, dotato di un solo elettrone "planetario": il nucleo ha una massa 1836 volte maggiore di quella dell'elettrone e carica uguale, con segno positivo. A questo nucleo si dà il nome di *protone*: una delle "particelle elementari" più importanti. L'energia cinetica dell'elettrone, secondo una facile deduzione, è

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 = e^2/8\pi\varepsilon_0 r$$

Il campo elettrostatico creato dal protone è un potenziale: $V = e/4\pi\varepsilon_0 r$; l'energia potenziale dell'elettrone è $U = -eV = -e^2/4\pi\varepsilon_0 r$. L'energia totale risulta, pertanto,

$$E = E_c + U = -e^2/8\pi\varepsilon_0 r$$

Il segno – è presente perché è necessario un lavoro negativo (contro la forza di attrazione del protone) per portare l'elettrone all'infinito. Dall'ultima espressione si ottiene il valore del raggio dell'orbita corrispondente a un valore E dell'energia:

$$r = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0(-E)}$$

Ad ogni valore dell'energia corrisponde dunque un valore determinato del raggio orbitale. Anche il modello planetario, come già il modello atomico di Thomson, presenta limiti notevoli. La teoria dell'elettromagnetismo ci insegna che una carica accelerata, come l'elettrone nell'atomo di Rutherford, emette radiazione e perde energia cinetica. In base a questo, la traiettoria di un elettrone sarebbe una spirale convergente sul nucleo (→ 6a): un tipo di traiettoria simile a quella di un satellite terrestre che, per effetto dell'attrito con l'atmosfera, perde velocità e spiraleggia verso la Terra (→ 6b). L'incongruenza tra il modello planetario, confermato dall'esperimento di Rutherford, e la teoria elettromagnetica, della cui validità esistono prove sicure, portò ad una revisione complessiva di tutta la meccanica classica.

Atomo di Bohr

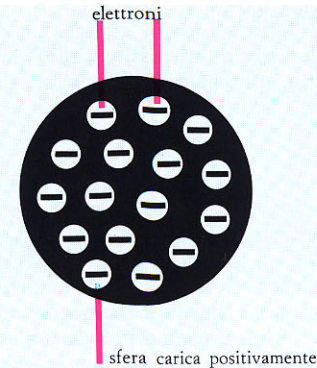
Analizziamo l'elettrone mobile dell'atomo di idrogeno sotto l'aspetto ondulatorio. È costituito da un treno di onde di De Broglie in propagazione lungo l'orbita. La lunghezza dell'orbita deve essere un multiplo delle lunghezze d'onda di De Broglie; altrimenti le onde sparirebbero (per interferenza distruttiva), e non vi sarebbe più elettrone (p. 79 → 1). Perciò:

$$2\pi r = n\lambda \quad \text{ovvero} \quad 2\pi r = n\frac{h}{mv}$$

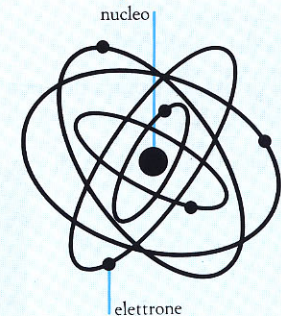
Da cui:

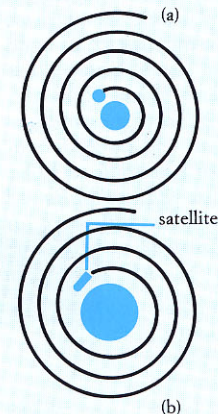
$$mvr = n\frac{h}{2\pi}$$

Poiché n deve essere un numero intero, mvr (cioè il momento cinetico dell'elettrone) può

I modelli atomici

1. Rappresentazione schematica dell'atomo, con carica positiva diffusa in tutto il suo volume, secondo l'idea di Thomson.

2. Schema dell'apparato sperimentale per lo studio delle particelle α.

3. Nel modello atomico di Thomson gli atomi hanno un campo elettrico debole, che comporterebbe piccole deviazioni di particelle α.

4. Il modello planetario di Rutherford: il nucleo carico positivamente è al centro delle orbite degli elettroni periferici.

5. Il modello planetario spiega in modo corretto la deviazione delle particelle α: quando passano vicino a un nucleo queste subiscono una rilevante deviazione. Altrimenti, l'influenza dei nuclei è debole e minima la deviazione.

6. Secondo la teoria elettromagnetica un elettrone accelerato intorno al nucleo perde energia cinetica: compirebbe quindi una spirale verso il nucleo (di lato, sopra). Una cosa simile accade anche al satellite che perde velocità per attrito con l'atmosfera.

prendere solo valori multipli di $h/2\pi$: dunque è *quantizzato*; l'intero n si dice *numero quantico principale*. Elevando al quadrato l'espressione del momento cinetico si ha:

$$m^2v^2r^2 = \frac{n^2h^2}{4\pi^2}$$

e dividendola per quella già ottenuta dell'energia cinetica abbiamo:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_o r}$$

da cui risulta:

$$r = \frac{\varepsilon_o n^2h^2}{\pi m e^2}$$

Il raggio dell'orbita elettronica non può quindi assumere tutti i valori, ma solo quelli corrispondenti a n = 1,2,3...
Sostituendo questa espressione di r in quella dell'energia

$$(E = -e^2/8\pi\varepsilon_o r)$$

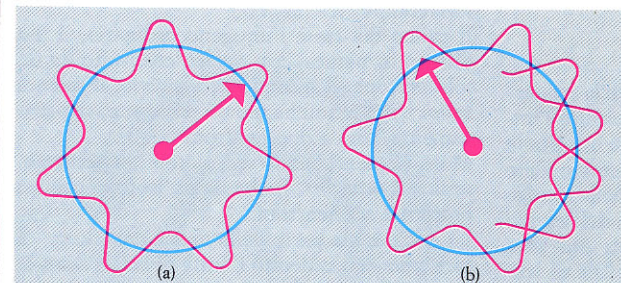
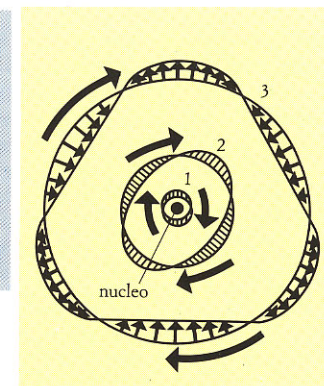
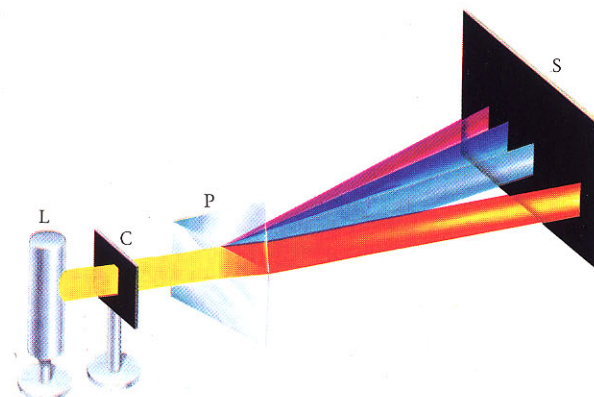
risulta:

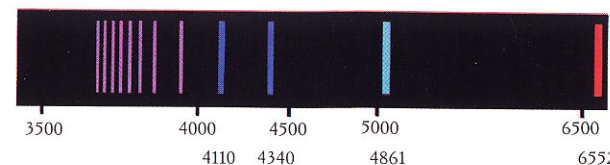
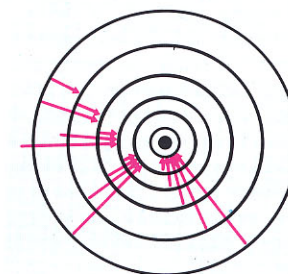
$$E = \left(-\frac{me^4}{8\varepsilon^2h^2}\right)\frac{1}{n^2}$$

L'energia dunque non può assumere valori con continuità, come nella meccanica classica, ma solo valori discreti, corrispondenti ai vari n. Questo modello, in cui si fonde la teoria di Rutherford con il concetto quantistico di onde di De Broglie, è dovuto al fisico danese Niels Bohr; i postulati su cui si fonda sono tre: 1. *l'elettrone si muove su orbite stazionarie senza emettere energia radiante* (→ 2); 2. *il momento cinetico dell'elettrone è multiplo di* $h/2\pi$; 3. *quando l'elettrone passa da un'orbita ad un'altra di minore energia, la differenza di energia viene emessa in forma di radiazione di frequenza* f, *cosicché* hf = ΔE (ΔE è la diminuzione di energia dell'atomo).
L'ultimo postulato risulta chiaro nel contesto della "nuova" teoria quantistica. L'elettrone può passare da un'orbita a un'altra, di raggio diverso, solo mediante un salto; altrimenti, se lo facesse con una traiettoria a spirale, il raggio di curvatura passerebbe per valori proibiti. Pertanto, l'energia passa bruscamente dal valore di un'orbita a quello di un'altra; una differenza di energia che viene emessa sotto forma di fotone.
Se, ad es., l'elettrone salta dall'orbita corrispondente al valore n del numero quantico principale a quella corrispondente al valore n' (n' > n), il fotone prende una frequenza f tale che:

$$hf = \frac{me^4}{8\varepsilon_o^2h^2}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2}\right)$$

Se n = 2, se cioè l'elettrone salta da un'orbita esterna alla seconda, le radiazioni hanno le lunghezze d'onda corrispondenti dello spettro visibile. Già Balmer (→ 3, 4) aveva osservato queste radiazioni mentre disperdeva con un prisma la luce proveniente da una lampada d'idrogeno.
Quando l'elettrone di un atomo si trova nell'orbita di minore energia (n = 1), si dice che si trova nel suo *stato fondamentale*; se ciò non avviene, si dice che è *eccitato*.
Gli atomi eccitati non possono rimanere tali: in frazioni di secondo passano agli stati di minore energia fino a raggiungere lo stato fondamentale. I salti dalle orbite più esterne all'orbita con n = 2 danno origine alle radiazioni visibili, che costituiscono la *serie di Balmer*. I salti alla prima orbita, ossia al livello fondamentale, che corrispondono a radiazioni di lunghezza d'onda troppo corta per eccitare l'occhio umano (*radiazioni ultraviolette*), costituiscono la *serie di Lyman*.
I salti dalle orbite più esterne alla terza, quarta e quinta danno radiazioni di lunghezza d'onda più lunga di quella della luce visibile (*radiazioni infrarosse*) e formano le *serie di Paschen, Brackett e Pfund* (→ 5).

L'atomo di Bohr

1. L'aspetto ondulatorio dell'elettrone dell'atomo di idrogeno: la sua orbita deve essere un multiplo della lunghezza d'onda (a sinistra). In caso contrario, si distruggerebbe per interferenza distruttiva (a destra).

2. Le prime tre orbite elettroniche dell'atomo di idrogeno (nel modello l'elettrone si muove su orbite stazionarie senza emettere energia).

3. Apparato sperimentale per determinare lo spettro di una lampada a idrogeno L: la luce incide su un prisma attraverso una fenditura e si scompone nelle sue componenti (visibili sullo schermo).

3500 4000 4500 5000 6500
4110 4340 4861 6552

4. La serie di Balmer per lo spettro dell'idrogeno (le lunghezze d'onda sono in Å).

5. Serie spettrali per l'idrogeno. I salti indicati, compiuti dall'elettrone fra le varie orbite, danno luogo alle cinque serie spettrali. I raggi delle orbite non sono disegnati in scala.

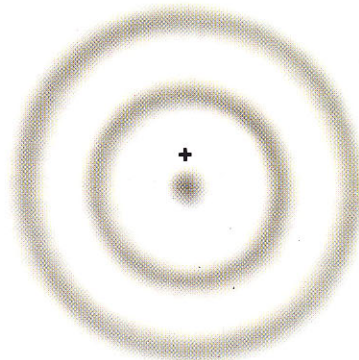
Fisica nucleare

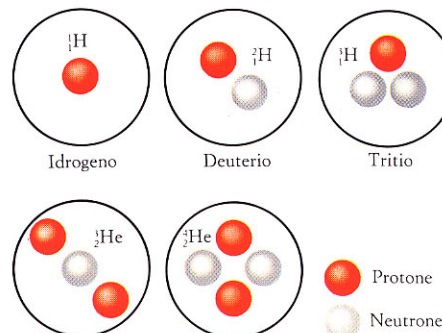
Il modello atomico e la meccanica quantistica
La teoria di Bohr è stata superata dalla moderna meccanica quantistica, che ha stabilito l'impossibilità di definire con precisione infinita le traiettorie delle particelle submicroscopiche (come è concettualmente possibile nella meccanica classica). Nella raffigurazione dell'atomo di idrogeno (→ 1) la punteggiatura più fitta corrisponde a una maggiore probabilità di trovare l'elettrone. In questo senso, possiamo definire con precisione solo il valore delle energie permesse (livelli atomici). In → 2 sono rappresentate le transizioni di un atomo di idrogeno.

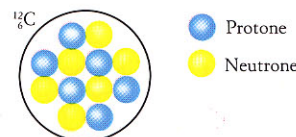
Nucleo atomico
Le proprietà chimiche degli atomi sono determinate dal numero di elettroni esistenti nella parte periferica. Ma il nucleo può subire una variazione della propria carica positiva, con alterazione del numero di elettroni che la compensano: in questo caso si può produrre un elemento che non è contemplato nel quadro iniziale.
Definiamo alcuni termini relativi al nucleo dell'atomo: *nucleone* è detta ogni particella costituente del nucleo; *numero di massa* è il numero di nucleoni contenuti. La massa dei nuclei è sempre uguale, con grande approssimazione, a un multiplo intero della massa del protone; si potrebbe pertanto affermare che i nuclei sono costituiti da protoni. Ma, nel 1932, Chadwick scoprì l'esistenza di una particella di massa molto vicina a quella del protone e priva di carica elettrica, per questo denominata *neutrone*.
Si è rilevato sperimentalmente che nei nuclei sono presenti protoni e neutroni. Il *numero atomico* è il numero dei protoni contenuti in un nucleo; gli atomi di numero atomico uguale possono contenere nel nucleo numeri diversi di neutroni. Il comportamento chimico è lo stesso, ma le masse degli atomi sono differenti (tali atomi dicono di *isotopi*).
Per rappresentare il nucleo di un elemento E si colloca a sinistra, come indice, il suo numero atomico Z e, come apice, il suo numero di massa A: $^{A}_{Z}E$.
I tre isotopi dell'idrogeno, ad esempio, si scriveranno: $^{1}_{1}H$ $^{2}_{1}H$ $^{3}_{1}H$.
Il primo dei tre è l'idrogeno ordinario, il più diffuso in natura, con nucleo costituito da un solo protone; il secondo è il *deuterio*, il terzo il *tritio*: i due ultimi hanno un protone e, rispettivamente, uno e due neutroni (→ 3).
Molti elementi hanno vari isotopi; in particolare il carbonio (→ 4) che ha un isotopo con sei protoni e sei neutroni.
La dodicesima parte della massa dell'atomo di carbonio è considerato l'unità di *massa atomica relativa*; il suo simbolo è la lettera u (corrispondente a $1{,}6603 \cdot 10^{-27}$ kg).
Riferite a questa unità, le masse dell'elettrone, del protone e del neutrone sono rispettivamente: $m_e = 5{,}486 \cdot 10^{-4}$ u; $m_p = 1{,}0073$ u; $m_n = 1{,}0087$ u.
Il raggio di un nucleo, come si ricava dall'esperienza di Rutherford, è dell'ordine di 10^{-15} m, ovvero 10^5 volte più piccolo della dimensione di un atomo.
I protoni, contenuti in una così ristretta regione, tendono ad allontanarsi (a causa della repulsione coulombiana). Se non esistessero altre forze a tenere legati i nucleoni, non si avrebbero nuclei stabili. È necessario ammettere l'esistenza di un nuovo tipo di interazione, che viene chiamata *interazione forte*, molto intensa per brevi distanze, e praticamente nulla per le distanze superiori al raggio nucleare (dove infatti essa non viene osservata).
In → 5 sono riportati i grafici dell'energia di interazione coulombiana e l'energia di interazione forte di due nucleoni in funzione della distanza fra di loro.
Si osserva che per $r \lesssim 2 \cdot 10^{-13}$ cm l'interazione forte predomina; per $r \gtrsim 2 \cdot 10^{-13}$ cm, l'unica interazione presente è quella coulombiana. Mentre l'interazione coulombiana agisce solo fra particelle cariche, l'interazione forte agisce su tutti i nucleoni. In un nucleo la forza di coesione risulta tanto maggiore quanto più alto è il numero dei nucleoni che sono presenti in esso.

Energia nucleare

Sperimentalmente si possono misurare, con notevole precisione, sia le masse nucleari sia le masse dei singoli nucleoni. La massa nu-

La meccanica quantistica

1. La meccanica quantistica individua le zone dove più alta è la probabilità di trovare un elettrone. Per l'atomo di idrogeno si ottiene questa rappresentazione.

2. Rappresentazione schematica dei "salti orbitali" che danno luogo all'emissione di radiazioni appartenenti alle prime serie spettrali dell'idrogeno. Le lunghezze d'onda della luce emessa sono uguali a quelle calcolate con la teoria di Bohr.

3. Gli isotopi di un elemento differiscono per il numero di massa: in alto, i tre dell'Idrogeno; sopra, i due dell'Elio.

5. Andamento dell'energia di interazione coulombiana (repulsiva) e dell'energia nucleare forte (attrattiva), in funzione della distanza tra due nucleoni. L'interazione forte è in pratica nulla per distanze superiori alle dimensioni atomiche.

4. Il nucleo di un atomo di Carbonio $^{12}_{6}C$.

cleare risulta sempre un poco inferiore alla somma delle masse dei singoli nucleoni costituenti. Questa differenza si dice *difetto di massa* del nucleo. A che cosa si deve?
La teoria della relatività indica che massa ed energia sono manifestazioni di una medesima cosa e che la relazione fra l'energia E e la massa m è $E = mc^2$ (dove c è la velocità della luce nel vuoto). In base a questa teoria, la massa scomparsa si è trasformata in *energia di legame*, liberata quando i nucleoni si sono uniti a formare il nucleo. Per disintegrare il nucleo nei suoi componenti, è necessario fornire la stessa energia. Così, un nucleo di numero atomico Z avrà Z protoni, che danno una massa

$$Zm_p$$

Se A è il suo numero di massa, il nucleo ha A - Z neutroni di massa totale $(Z - A)\, m_n$. Se indichiamo con m la massa del nucleo, il difetto di massa è:

$$Z\, m_p + (A - Z)\, m_n - m$$

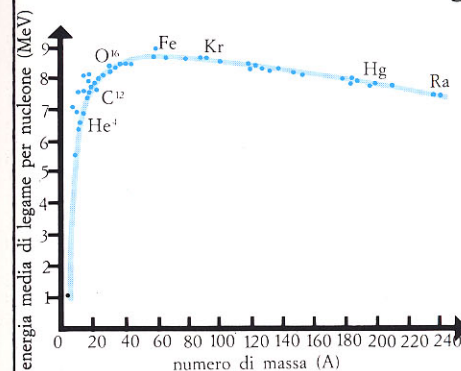
Poiché una unità di massa atomica equivale, in base a quanto si è detto a proposito della relazione relativistica, ad un'energia di 931 MeV, l'energia di legame del nucleo considerato è pari a:

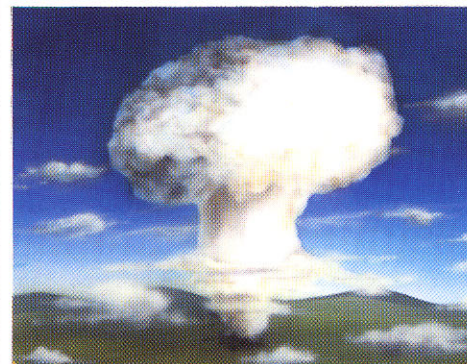
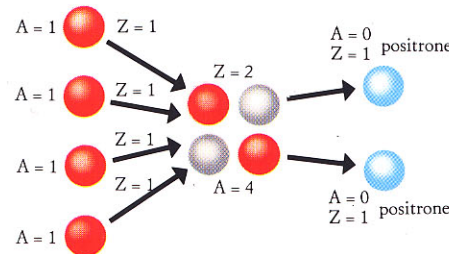
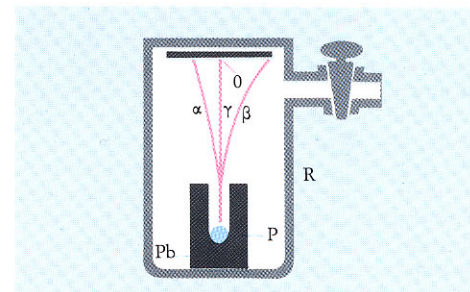
$$931\, [Z\, m_p + (A - Z)\, m_n - m]\ \text{MeV}$$

I nuclei più stabili sono quelli che hanno maggiore energia di legame per nucleone; essi richiedono dunque maggiore energia per la disintegrazione. Sono di numero atomico intermedio, al quale corrispondono circa 8,75 MeV/nucleone (→ 1).

Fissione e fusione nucleari
L'energia di legame dell'isopoto dell'uranio 235 è di 7,6 MeV/nucleone. Se si potesse spezzare questo nucleo in due parti quasi uguali, si avrebbero due nuclei corrispondenti alla regione del massimo della curva (→ 1); in tal caso avrebbero ambedue la maggiore energia di legame per nucleone: in questo processo, detto di *fissione* (→ 2), si libera una grande energia (poco meno di 200 MeV). La grande quantità di fissioni che si hanno in una bomba atomica, permette di liberare l'enorme energia da cui derivano gli effetti catastrofici di questo genere di bomba (→ 3).
Volendo elevare l'energia di legame per nucleone (così da ottenere liberazione di energia) si può passare dall'idrogeno all'isotopo dell'elio, di massa 4.
Quattro protoni si possono unire e dar luogo a un nucleo di elio di massa 4 e a due elettroni positivi, liberando un'energia di 27,7 MeV (→ 4). È l'effetto utilizzato per realizzare la bomba all'idrogeno (bomba H). Per questo processo di fusione è necessaria una temperatura elevatissima, che si ottiene con una bomba atomica a fissione funzionante da innesco.

Radioattività
Nel 1896 Becquerel osservò che la presenza di determinate sostanze (da lui chiamate *radioattive*) appannava le lastre fotografiche, avvolte in carta nera all'interno di *chassis* metallici. Molti sono gli elementi radioattivi conosciuti in natura. Poniamo uno solo tra questi, o uno dei suoi sali, all'interno di un blocco di piombo in cui sia stato praticato un foro, da qui escono le radiazioni del corpo radioattivo. Sotto l'azione di un campo magnetico, le radiazioni si dividono in tre fasci: raggi *alfa, beta* e *gamma* (→ 5).
I raggi alfa deviano come le cariche positive; sono infatti costituiti da nuclei di elio (due protoni e due neutroni), che si dicono *particelle* α. I raggi beta deviano come cariche elettriche negative: sono formati da elettroni (*particelle* β da cui il nome di betatrone dato al dispositivo acceleratore di elettroni). I raggi γ, infine, non sono deviati né dai campi magnetici né dai campi elettrici; sono fotoni di energia uguale o maggiore di quella dei raggi X, a seconda dell'elemento che li emette. Ogni elemento radioattivo (le eccezioni sono poche) può disintegrarsi dando una particella α o una particella β (sempre α o sempre β), accompagnando la disintegrazione con emissioni γ. Data la complessità delle teorie della disintegrazione α e β, ci limiteremo solo ad alcuni cenni.
Nell'interno dei nuclei, due protoni e due neutroni possono unirsi e formare una particella α, la cui energia di legame per nucleone è abbastanza elevata, dunque stabile.
Una particella α, all'interno di un nucleo pesante, è soggetta ad un potenziale V schematicamente riportato in (→ 1). Classicamente, essa potrebbe uscire dal nucleo solo se la sua

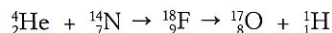
Energia nucleare

1. L'andamento dell'energia di legame media per nucleone, in funzione del numero di particelle del nucleo.

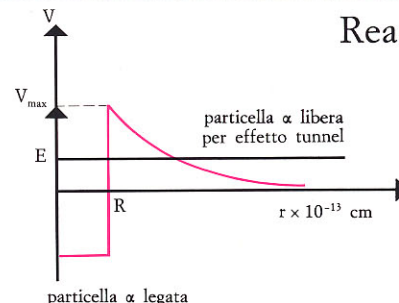
2. Una reazione nucleare: la fissione di un nucleo di $^{235}_{92}U$ libera una grande energia e dà luogo a due nuclei con quasi la stessa massa complessiva.

3. L'esplosione di una bomba atomica.

4. Una reazione nucleare: con la fusione di quattro protoni si formano un nucleo di elio ^4_2He e due positroni (elettroni positivi).

5. Un esempio di radioattività naturale. In un contenitore R sotto vuoto è posto, all'interno di un blocco di piombo, un corpo radioattivo P. La radiazione emessa sotto l'azione di un campo magnetico si divide in raggi α, raggi β, raggi γ.

energia fosse maggiore di V_{max}. Quantisticamente invece si può spiegare la presenza di particelle α emesse con $E < V_{max}$ con l'effetto tunnel.
Ogni nucleo che emette radiazioni α ha un determinato periodo tipico di decadimento e, analogamente, l'energia cinetica di emissione delle particelle α è caratteristica della sorgente radioattiva.
Il decadimento β ha una natura completamente diversa dal decadimento α; esso inoltre non si presenta solo in nulcei radioattivi, ma anche in particelle elementari come il neutrone. Un neutrone libero decade (→ 3), con una vita media di 10,8 minuti. In modo analogo, si ha decadimento β all'interno di nuclei radioattivi (→ 4).
L'energia disponibile per il decadimento di un neutrone libero è di circa 0,8 MeV e viene suddivisa fra le particelle che derivano dal decadimento. In particolare, gli elettroni hanno una determinata distribuzione dell'energia caratteristica dell'elemento radioattivo (→ 5). Tutti i decadimenti nucleari, in cui si abbia emissione di elettroni, sono dovuti a decadimento β.
È facile intuire che, quando un elemento mostra una disintegrazione α, il suo numero atomico diminuisce di due unità e il suo numero di massa di quattro. Si trasforma dunque in un elemento diverso da quello iniziale. Anche la disintegrazione β trasforma un elemento in un altro: in → 4, ad esempio, si illustra il decadimento β del Litio ($^{8}_{3}$Li), il cui nucleo ha 3 protoni e 5 neutroni, con un numero di massa 8; per decadimento β un neutrone si trasforma in un protone: il nuovo nucleo ha 4 protoni e 4 neutroni, il numero atomico aumenta di una unità, il numero di massa rimane 8.
Per quanto riguarda una determinata massa di un dato elemento radioattivo, gli atomi si disintegrano l'uno dopo l'altro, e non tutti insieme, perché non si trovano, nello stesso istante, nelle medesime condizioni favorevoli alla propria disintegrazione. Il tempo che deve trascorrere perché questa massa di elementi radioattivi si riduca alla metà di quella iniziale riceve il nome di *periodo di dimezzamento*.
In natura sono tre le famiglie di elementi radioattivi: quella dell'uranio, quella dell'attinio e quella del torio. Esiste un'altra famiglia radioattiva — la famiglia del nettunio —, ma, derivando da un elemento prodotto artificialmente dall'uomo (plutonio 241) non si rinviene in natura. Si veda (→ 6) il diagramma della famiglia dell'uranio; l'isotopo iniziale è l'^{238}U, quello finale il ^{206}Pb; per ogni transizione è indicata la media.
Un corpo composto interamente di ^{238}U, o di un qualsiasi altro isotopo capostipite, dopo un certo periodo di tempo non risulta costituito dall'elemento iniziale, ma da una serie di altri elementi: dalla percentuale di altri elementi della famiglia, rinvenuti nel corpo, è possibile risalire alla sua età. Su questo si basa di norma la determinazione dell'età dei reperti archeologici e dei fossili.

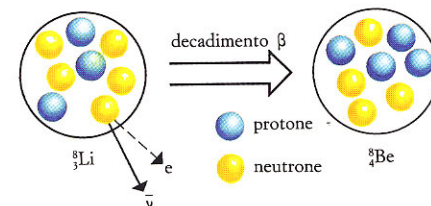
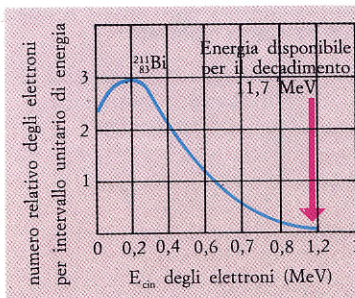
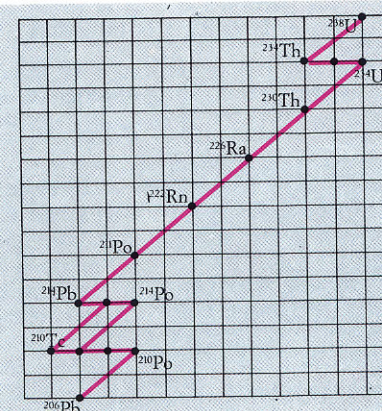
Reazioni nucleari

I corpi radioattivi naturali si trasformano in corpi diversi in modo spontaneo; in determinate condizioni si può ottenere che due nuclei possano scambiarsi parte dei loro nucleoni, dando luogo ad altri nuclei: si tratta di una reazione nucleare artificiale. In tali reazioni si deve conservare la carica elettrica totale, il numero totale di nucleoni e l'energia relativistica. La prima reazione nucleare artificiale fu realizzata da Rutherford bombardando l'azoto con particelle α. Egli ottenne ossigeno e un protone, secondo la seguente reazione nucleare (p. 87 → 1):

$$^{4}_{2}\text{He} + {}^{14}_{7}\text{N} \rightarrow {}^{18}_{9}\text{F} \rightarrow {}^{17}_{8}\text{O} + {}^{1}_{1}\text{H}$$

In ognuno dei membri di questa doppia reazione la somma degli indici è 9 (conservazione della carica) e la somma degli apici è 18 (conservazione del numero dei nucleoni).
La somma delle masse del protone e dell'ossigeno è leggermente maggiore di quella delle masse delle particelle α e dell'azoto, ma questo *difetto di massa* è compensato con l'energia delle particelle che reagiscono. Se la particella α ha un'energia cinetica di 9 MeV, che equivale ad una massa superiore al difetto di massa, l'energia eccedente si distribuisce come energia cinetica dei prodotti di reazione $^{17}_{8}$O e $^{1}_{1}$H.
In questa reazione, la particella α è penetrata nel nucleo dell'azoto in virtù della sua energia cinetica. Il nuovo elemento ha numero atomico pari a 9; è un isotopo del fluoro che non si

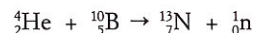
Reazioni nucleari

1. Andamento del potenziale nucleare a cui è soggetta una particella α in un nucleo pesante.

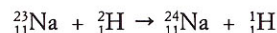
2. Decadimento del radio: il nucleo emette una particella α più energia, e si trasforma in **radon**.

3. Il decadimento β di un neutrone: dopo una vita media di circa 11 minuti al di fuori del nucleo il neutrone decade trasformandosi in protone.

4. Il decadimento β di un atomo di Litio $^{8}_{3}$Li in Berillio $^{8}_{4}$Be: un neutrone si trasforma in protone ed emette un elettrone e un antineutrino.

5. La distribuzione degli elettroni emessi da un atomo radioattivo in funzione della loro energia cinetica.

6. La famiglia radioattiva dell'uranio: i segmenti diagonali rappresentano i decadimenti α; i segmenti orizzontali indicano i decadimenti β.

trova in natura, perché molto instabile: infatti si disintegra e dà ossigeno e un protone. Si vedano le reazioni (→ 2, 3):

$$^{4}_{2}He + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n$$

$$^{1}_{0}n + ^{6}_{3}Li \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{3}_{1}H$$

In entrambe i prodotti finali non sono isotopi stabili: l'azoto $^{13}_{7}N$ ha un periodo di decadimento di 10 minuti e il tritio $^{3}_{1}H$ di 5600 anni. Entrambi subiscono il decadimento β (→ 4 e 5). Altri isotopi radioattivi possono essere prodotti per mezzo di reazioni nucleari. Bombardando il sodio $^{23}_{11}Na$ con deutoni $^{2}_{1}H$ (nuclei di deuterio), si ottiene, ad esempio, un isotopo del sodio, l'$^{24}_{11}Na$, e un protone, secondo la reazione:

$$^{23}_{11}Na + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{24}_{11}Na + ^{1}_{1}H$$

L'isotopo del sodio $^{24}_{11}Na$ è instabile; esso decade emettendo una particella β e trasformandosi in magnesio stabile. Il periodo di decadimento del sodio radioattivo è di 14,8 ore.
Gli isotopi radioattivi, prodotti dall'uomo ma non presenti in natura, sono detti *artificialmente radioattivi*; essi rivestono un'importanza notevole nel campo della medicina.

Antimateria

Il *positrone* è una particella che ha la stessa massa dell'elettrone; la carica è la medesima ma positiva: esso è l'immagine speculare dell'elettrone. Il positrone, incontrando un elettrone, si disintegra con emissione di due o più radiazioni γ. La distruzione ha luogo dopo che le due particelle hanno costituito una specie di atomo, il *positronio*, del quale è stato ottenuto lo spettro (→ 6). La massa dell'una e dell'altra particella è di 0,51 MeV; nella loro distruzione producono fotoni di energia totale pari almeno a 1,02 MeV. Con un fotone di 1,02 MeV si può creare una coppia elettrone-positrone nei punti dove esista un campo elettrico molto forte (→ 7): ad es. in prossimità dei nuclei atomici pesanti. Mandando raggi X di frequenza adeguata sopra una lamina di piombo si generano, in questa, coppie di elettroni-positroni, si trasforma cioè l'energia radiante in materia. L'elettrone e il positrone non sono l'unica coppia particella-antiparticella: in realtà, la teoria quantistica relativistica richiede che *ogni* particella elementare abbia un'antiparticella con la stessa massa e con carica opposta.
Dopo la conferma sperimentale dell'esistenza dei positroni gli studi si sono orientati verso la ricerca di antiprotoni e di antineutroni. Negli anni 50, si sono prodotte e individuate coppie di protoni-antiprotoni e di neutroni-antineutroni con energie, rispettivamente, di 1876,6 MeV e 1879,2 Mev. In teoria, si potrebbero quindi produrre antiatomi costituiti da antiprotoni, antineutroni e antipositroni (→ 8). Poiché essi si annullerebbero a contatto con la materia ordinaria non sono stati finora osservati.

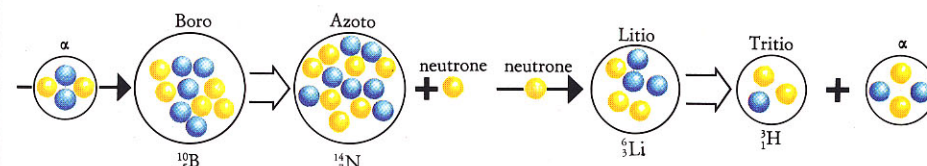
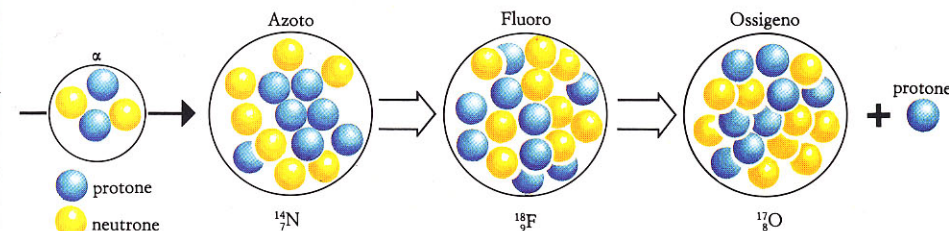
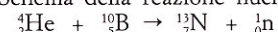
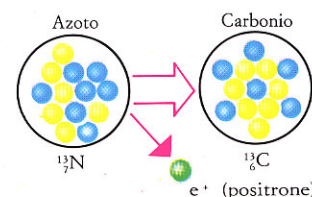
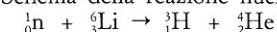
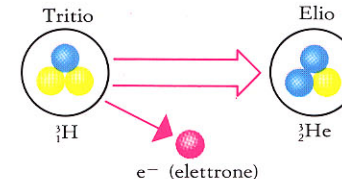
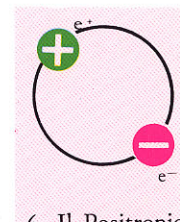
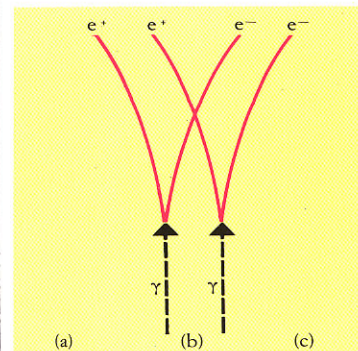
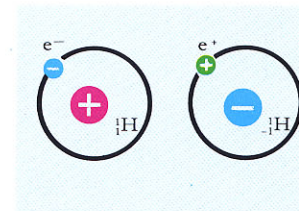
Antimateria

2. Schema della reazione nucleare: $^{4}_{2}He + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n$

3. Schema della reazione nucleare: $^{1}_{0}n + ^{6}_{3}Li \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He$

4. L'isotopo $^{13}_{7}N$ dell'Azoto è radioattivo e decade per emissione β.

5. Il Tritio $^{3}_{1}H$ è un isotopo radioattivo dell'Idrogeno e decade per emissione β.

6. Il Positronio è dato da un elettrone e da un positrone.

7. Le coppie di traiettorie a forma di V rappresentano coppie di elettroni-positroni ottenuti materializzando raggi γ. Il campo magnetico devia in sensi opposti le cariche di segno contrario.

8. Materia-antimateria a confronto: a sinistra, un atomo di idrogeno; a destra un atomo di antiidrogeno costituito da un positrone e da un antiprotone.

Tavola delle grandezze

Grandezze	Unità del sistema S.I.	Simboli	Dimensioni fisiche nei sistemi S.I., CGS	Unità del sistema CGS	Conversione nel sistema S.I.
lunghezza	metro	m	L	centimetro	10^{-2} m
massa	chilogrammo	kg	M	grammo	10^{-3} kg
tempo	secondo	sec o s	T	secondo	
area	metro quadrato	m^2	L^2	centim. quadrato	10^{-4} m^2
volume	metro cubo	m^3	L^3	centimetro cubo	10^{-6} m^3
angolo	radiante	rad	—	radiante	
velocità	metro al secondo	m/s	LT^{-1}	centimetro al sec	10^{-2} m/s
accelerazione	metro al sec al sec	m/s^2	LT^{-2}	centimetro al sec al sec	10^{-2} m/s^2
frequenza	hertz	Hz	T^{-1}	hertz	
forza	newton	N	LMT^{-2}	dina	10^{-5} N
momento	newton per metro	N m	L^2MT^{-2}	dina per centim.	10^{-7} N m
lavoro, energia	joule	J	L^2MT^{-2}	erg	10^{-7} J
potenza	watt	W	L^2MT^{-3}	erg al sec	10^{-7} W
quantità di moto impulso	newton per sec	N sec	LMT^{-1}	dina per sec	10^{-5} N s
densità	chilogrammo al m^3	kg/m^3	$L^{-3}M$	grammo al cm^3	10^3 kg/m^3
peso specifico	newton al m^3	N/m^3	$L^{-2}MT^{-2}$	dina al cm^3	10 N/m^3
pressione	newton al m^2	N/m^2	$L^{-1}MT^{-2}$	dina al cm^2 (baria)	10^{-1} N/m^2

Grandezze	Unità del sistema S.I.	Simboli
intensità di corrente	ampere	A
carica elettrica	coulomb	C
intensità di campo elettrico	newton al coulomb volt al metro	N/C V/m
potenziale	volt	V
capacità	farad	F
costante dielettrica	farad al metro	F/m
resistenza, impedenza	ohm	Ω
resistività	ohm per metro	Ω·m
energia elettrica	joule	J
potenza elettrica	watt	W
induzione magnetica	weber al metro q.	Wb/m^2
permeabilità magnetica	henry al metro	H/m
flusso di induzione magnetica	weber	Wb
induttanza	henry	H

Glossario

Accelerazione: variazione della velocità.
Atomo: dal greco *atomos*=indivisibile, era ritenuto la più piccola particella di materia esistente senza struttura. Oggi ha una struttura costituita da un massiccio nucleo centrale (a sua volta corpuscolare) dotato di carica positiva, attorno al quale si muovono elettroni con carica negativa: in un atomo completo stabile la carica complessiva è nulla.
Attrito: resistenza che un materiale pone allo scivolamento o al rotolamento di un oggetto su di esso o al suo interno.
Calore: forma di energia (termica) posseduta da un corpo connessa al moto di agitazione delle molecole che lo formano; più un corpo è caldo, più le sue molecole si muovono. Il loro moto può dare origine a un lavoro meccanico: il vapore caldo nella macchina a vapore, ad esempio, espandendosi può spingere un pistone (forza del vapore x spostamento= Fx s=lavoro).
Campo: zona dello spazio dove si risentono gli effetti di una forza elettrica o magnetica.
Combustione: reazione tra un composto o elemento e l'ossigeno con sviluppo di calore. L'ossigenazione delle *sostanze combustibili* avviene con produzione di luce e calore.
Composto: materia costituita da molecole formate da due o più atomi diversi.
Corrente elettrica: flusso di elettroni in un corpo conduttore posto in un campo elettrico.
Elettrone: particella subatomica con carica elettrica negativa; è la più piccola quantità di carica elettrica esistente in natura, della quale tutte le altre sono multipli interi. È indivisibile.
Energia: capacità di un corpo di compiere un lavoro posseduta in virtù del suo stato chimico o fisico.
Entropia: tendenza al peggioramento della qualità dell'energia posseduta da un corpo, da un sistema o dall'universo.
Forza: è la causa che modifica lo stato di quiete o di moto uniforme di un corpo, caratterizzata da intensità, direzione, verso e punto di applicazione.
Ione: atomo o molecola con carica elettrica positiva o negativa rispetto alla loro normale configurazione di sistema elettricamente neutro; tale valenza è dovuta alla perdita o all'acquisizione di uno o più elettroni o gruppi atomici elettricamente carichi.
Lavoro: è definito in Fisica come $L= F$x s risultato dal prodotto fra la forza F che agisce su un corpo e lo spostamento s che il corpo compie lungo la direzione della forza. Contrariamente al linguaggio comune, se non c'è spostamento (per es. se si tiene una valigia sollevata da terra senza muoversi) il lavoro è nullo: i concetti di lavoro e di fatica fisica vanno tenuti ben distinti.
Massa: concetto tra i più difficili in Fisica, sul quale ancora adesso ci si affatica per fornire una definizione accettabile e inequivocabile. In Fisica classica è definita come la quantità di materia che compone un corpo. Con Einstein, la massa è stata considerata come un altro aspetto dell'energia, una sorta di energia "condensata": secondo la Legge di Einstein, essa è legata all'energia dall'equazione $E = m \times c^2$, dove c è la velocità della luce nel vuoto (costante).
Materia: sostanza di cui sono fatti gli oggetti sensibili, provvista di consistenza, peso e inerzia, estesa nello spazio e capace di assumere una forma. È costituita da molecole di elementi chimici e/o di composti.
Modello atomico: schematizzazione della struttura dell'atomo; all'inizio del secolo vennero proposti vari modelli.
Molecola: combinazione di due o più atomi dello stesso elemento o di elementi diversi (composto) legati da forze elettromagnetiche.
Potenza: grandezza che indica l'energia (meccanica, elettrica, termica, ecc.) che in un dato fenomeno viene scambiata nell'unità di tempo.
Radiazione: forma di propagazione dell'energia elettromagnetica che si comporta talvolta come un'onda elettromagnetica e talvolta come un flusso di fotoni o corpuscoli.
Radioattività: fenomeno presentato da alcuni elementi naturali e sintetici (transuranici) secondo il quale si ha una modificazione permanente dei nuclei atomici detta *decadimento radioattivo*. Si conoscono tre tipi di emissioni radioattive: raggi α (costituiti da nuclei di elio), raggi ß (costituiti da elettroni) e raggi γ (costituiti da energia).
Spettro: figura luminosa che si ottiene raccogliendo su uno schermo la luce emergente da un prisma colpito dal fascio di luce che si vuole analizzare.
Temperatura: è una misura della "concentrazione" di calore in un dato corpo.
Termodinamica: parte della Fisica che studia le trasformazioni di energia termica in lavoro o in altre forme di energia, e viceversa, attraverso macchine termiche di ogni tipo.

Indice analitico

INDICE DELLE TAVOLE

Finito di stampare nel mese di febbraio 1998 presso Giunti Industrie Grafiche S.p.A. Stabilimento di Prato

Fisica

Stefania De Curtis
Julián Fernández Ferrer

Illustrazione d'apertura: un evento di neutrino fotografato grazie all'impiego di una camera a bolle, evidenziato da falsi colori.

La freccia (→) rinvia dal testo alla illustrazione della pagina a fronte.
Per le illustrazioni di pagine diverse è dato, prima della freccia, il numero di pagina.

ISBN 88-09-21337-8

Idea Books, Barcelona
Prima edizione: 1986. Seconda edizione: giugno 1993.
Terza edizione: febbraio 1998

INDICE DELLA MATERIA